

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ПОДОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ  
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Электрический привод и электрооборудование

**Направление подготовки:** 35.03.06 Агроинженерия

**Профиль подготовки:** Технические системы в агробизнесе

**Форма обучения:** очная

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Конспект лекций	3
1.1 Лекция №1 - Машины постоянного тока	3
1.2 Лекция №2 - Трехфазный асинхронный электродвигатель	18
1.3 Лекция №3 - Тормозные режимы трехфазного асинхронного электродвигателя	26
1.4 Лекция №4 - Синхронный электродвигатель	34
1.5 Лекция №5 - Двигатели специального назначения	40
1.6 Лекция №6, 7 - Основы электропривода	49
1.7 Лекция №8, 9, 10, 11 - Электропривод технологических машин и оборудования	55
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ	63
2.1 Лабораторная работа № ЛР-1 - Изучение универсального лабораторного стенда	63
2.2 Лабораторная работа № ЛР-2 - Исследование электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения	67
2.3 Лабораторная работа № ЛР-3 - Изучение схемы управления асинхронным электродвигателем с переключением со «звезды» на «треугольник»	70
2.4 Лабораторная работа № ЛР-4 - Схема реверсивного управления асинхронным электродвигателем с торможением противовключением	74
2.5 Лабораторная работа № ЛР-5 - Исследование центробежного вентилятора	77
2.6 Лабораторная работа № ЛР-6 - Исследование механической характеристики щунтового электродвигателя в режиме динамического торможения	81
2.7 Лабораторная работа № ЛР-7 - Механические характеристики асинхронного электродвигателя	85
2.8 Лабораторная работа № ЛР-8 - Исследование электропривода генератора	89
2.9 Лабораторная работа № ЛР-9 - Исследование электропривода вакуумного насоса	93

# 1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## 1.1 Лекция № 1. (2 часа)

Тема: «Машины постоянного тока».

### 1.1.1 Вопросы лекции

1. Классификация машин постоянного тока.
2. Паспортные данные электродвигателей постоянного тока.
3. Устройство и принцип действия машин постоянного тока.
4. Схемы включения и механические характеристики электрических двигателей постоянного тока.
5. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока
6. Работа двигателей в тормозных режимах.

### 1.1.2 Краткое содержание вопросов

1. Классификация электрических машин постоянного тока.

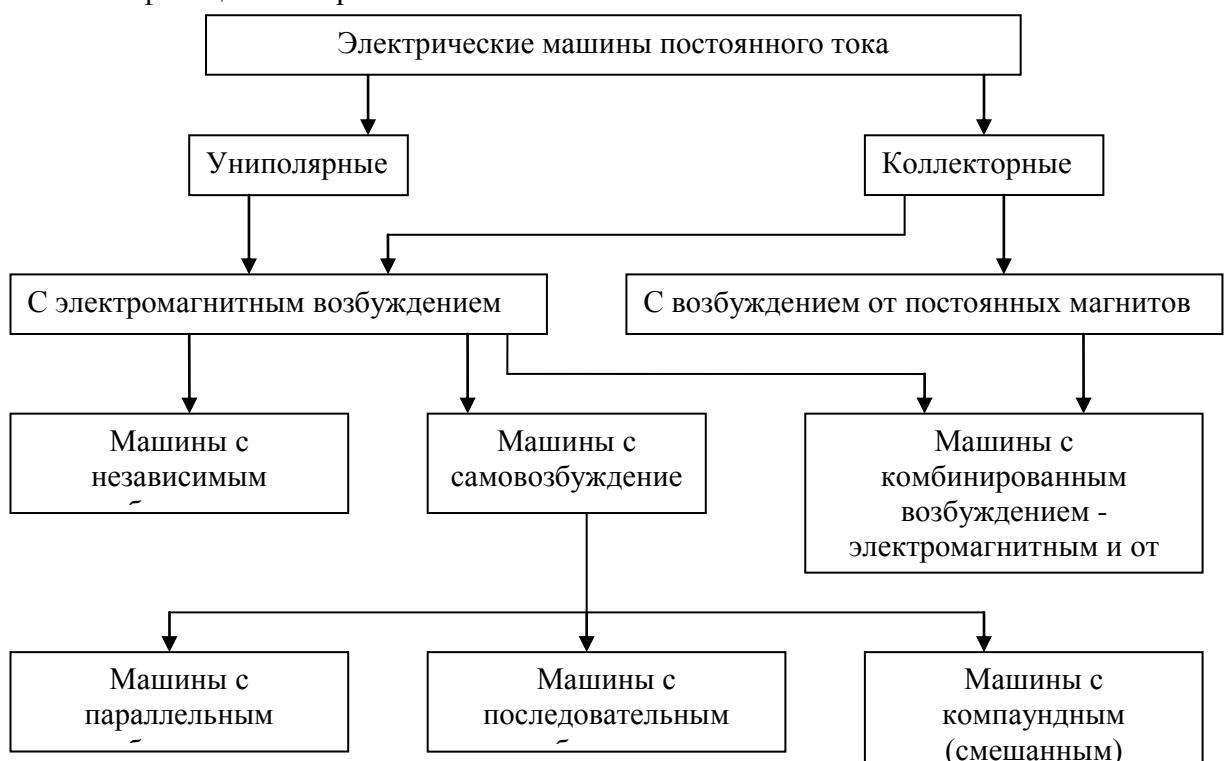


Рис. 1.1. Классификация электрических машин по роду тока, принципу действия и типу возбуждения.

### 2. Паспортные данные электродвигателей

Каждый электродвигатель имеет закреплённую на его корпусе табличку (паспорт) с приведёнными на нём паспортными данными, включающими тип (марку) электродвигателя и номинальные, т. е. расчётные данные электродвигателя. Они приводятся обычно в следующем составе и последовательности.

1. Прежде всего, на паспорте указывается номинальная мощность электродвигателя, развиваемая на валу, т. е. полезная мощность электродвигателя ( $P_n$ ). Приводится она в киловаттах. Для использования в расчётах её необходимо переводить в ватты, умножив указанную величину на 1000. Для того чтобы подчеркнуть, что номинальная мощность указывается на валу, в её обозначение часто вводится индекс

$P_2$ ( $P_{2H}$ ) в отличие от мощности, потребляемой электродвигателем при номинальном режиме из сети ( $P_{1H}$ ).

2. Указывается также число оборотов электродвигателя в минуту при номинальной загрузке ( $n_H$  об/мин). Эта величина не входит в состав единиц измерения Международной системы единиц измерения (СИ), поэтому для использования в расчётных выражениях её следует переводить в частоту вращения  $\omega_H$ , равную  $\pi n_H / 30$  в радианах в секунду 1/с.

3. На паспорте электродвигателя указывается напряжение, на которое рассчитаны обмотки электродвигателя (номинальное напряжение  $U_H$ ). 4. Указывается также номинальный ток электродвигателя ( $I_H$ ) в амперах.

4. На паспорте указывается также режим работы электродвигателя по нагрузке: s1 – длительный; s2 – кратковременный; s3 – повторно кратковременный; и т. д..

5. Указывается также класс изоляции по нагревостойкости: V – допустимая температура 90 °C; A – 105 °C; E – 120 °C; B – 130 °C; F – 155 °C; и т. д.

### 3. Устройство и принцип действия машин постоянного тока.

Принцип действия электрических машин постоянного тока основан на явлении электромагнитной индукции и возникновении электромагнитной силы, действующей на проводник с током в магнитном поле. Одну часть машины, где создаётся основной магнитный поток (поток возбуждения), называют индуктором, а другую часть, представляющую собой совокупность проводников (обмотку), пересекающихя потоком возбуждения, и в которой индуцируется ЭДС, — якорем. Кроме того, одна из указанных частей машины подвижная (ротор), а другая — неподвижная (статор).

Принцип работы машины постоянного тока рассмотрим на примере модели генератора в виде одного витка, вращающегося с угловой скоростью  $\omega$  в магнитном поле неподвижных постоянных магнитов N—S (рис. 1.2). При вращении витка в его проводниках, находящихся в магнитном поле, индуцируются ЭДС  $e$ , направление которых определяют по правилу правой руки. Согласно этому правилу ладонь правой руки располагают в магнитном поле так, чтобы в нее входили магнитные силовые линии, имеющие направление от полюса N к полюсу S, а отогнутый большой палец показывал направление движения проводника. Тогда остальные вытянутые пальцы укажут направление ЭДС. Таким образом, для указанного на рисунке 2.2, а – положения витка в верхнем проводнике витка ЭДС  $e$  направлена «к нам», а в нижнем — «от нас». При этом направление ЭДС в проводнике не меняется, пока он находится под полюсом данной полярности. Значение же ЭДС при вращении витка изменяется. Когда плоскость витка перпендикулярна к магнитным силовым линиям, то в его проводниках ЭДС не наводится, так как они не пересекают магнитные силовые линии, а лишь скользят по ним. Затем при повороте витка ЭДС в проводниках увеличивается и достигает максимального значения, когда проводники находятся точно под серединой полюса.

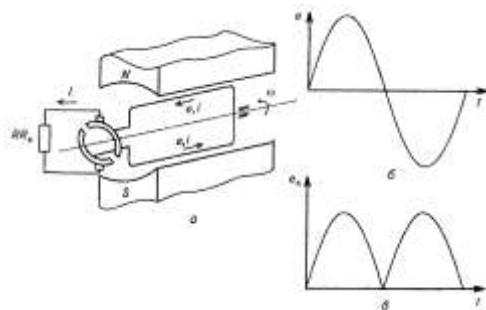


Рис. 1.2. Простейшая модель генератора постоянного тока (а) и кривые ЭДС в сторонах витка (б) и на щетках (в)

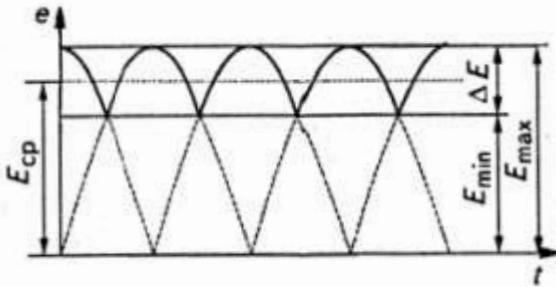


Рис. 1.3. Кривая ЭДС на зажимах генератора с двумя витками на якоре:  
е — мгновенное значение ЭДС;  $E_{\min}$ ;  $E_{\max}$ ;  $E_{cp}$  — соответственно максимальное, минимальное и среднее значение ЭДС

При дальнейшем повороте витка ЭДС в проводниках уменьшается и снова становится равной нулю.

Далее каждый проводник попадает под полюс другой полярности и направление ЭДС изменяется на противоположное. Следовательно, в витке индуцируется переменная ЭДС, изменяющаяся по синусоидальному закону (рис. 1.2, б). Чтобы выпрямить ЭДС, надо начало и конец витка подсоединить к двум полукольцам, вращающимся вместе с витком. Снимаемая щетками с полукольц ЭДС  $e$  постоянна по знаку, так как к каждой щетке поочередно подходят стороны витка с постоянным знаком ЭДС. При этом ток  $I$  во внешней цепи с сопротивлением нагрузки  $R_h$  протекает только в одном направлении (от верхнего полукольца к нижнему) и, следовательно, является постоянным.

Кривая ЭДС, снимаемая со щеток, представлена на рисунке 1.2, в. ЭДС постоянна по знаку, но меняется по амплитуде (пульсирует). Для уменьшения пульсаций используют несколько витков, смещенныхных в пространстве под углом один относительно другого и подсоединеных к соответствующим частям кольца.

На рисунке 1.3 показана кривая ЭДС, снимаемая с двух витков. Они смещены в пространстве и присоединены к четырем равным частям разрезанного кольца. Эти части изолированы одна относительно другой. При большем числе витков части кольца в виде пластин образуют механический выпрямитель, называемый коллектором.

Таким образом, главная особенность машин постоянного тока — наличие коллектора и скользящего контакта (щеток) между обмоткой якоря и внешней цепью. В генераторах коллектор служит механическим выпрямителем, а в двигателях, когда якорь подключают к источнику постоянного тока, коллектор выполняет роль преобразователя частоты. В этом случае он связывает сеть постоянного тока с обмоткой, по проводникам которой протекает переменный ток. Машины постоянного тока с коллектором называют коллекторными машинами постоянного тока.

Двухполюсная машина постоянного тока приведена на рисунке 1.4, а. Машина имеет обмотку возбуждения, расположенную на полюсах  $N$  и  $S$  статора. По обмотке пропускают постоянный ток возбуждения, который создает магнитный поток возбуждения  $\Phi_0$ . На роторе находится обмотка, в которой при вращении наводится ЭДС. Таким образом, ротор машины постоянного тока служит якорем, а полюса (индуктор) находятся на статоре.

При вращении якоря проводники обмотки перемещаются от одного полюса к другому и ЭДС, наводимая в них, будет переменной. Однако под каждым полюсом всегда остается постоянное число витков, с которых с помощью коллектора и щеточного контакта снимается выпрямленная ЭДС. Обмотку якоря выполняют замкнутой и симметричной (рис. 1.4, б), а щеточные контакты делят ее на параллельные ветви. При отсутствии внешней нагрузки ток  $i_a$  в параллельных ветвях отсутствует, так как ЭДС, индуцируемые в них, взаимно компенсируются. ЭДС в проводниках обмотки, расположенных на линии, перпендикулярной к оси полюсов, не наводится, так как витки скользят

по силовым линиям магнитного поля. Эту линию называют геометрической нейтралью машины.

При подключении нагрузки в обмотке якоря появляется ток, протекающий по каждой из параллельных ветвей.

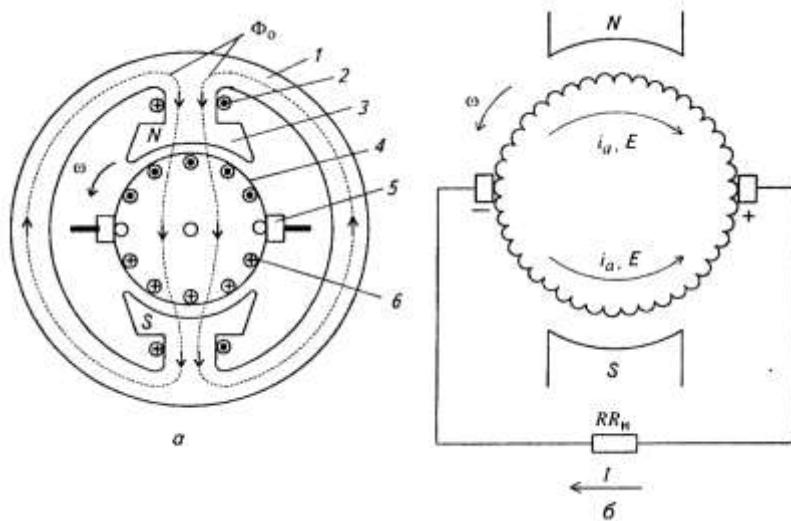


Рис. 1.4. Электромагнитная схема двухполюсного генератора постоянного тока (а) и эквивалентная схема обмотки якоря (б):

1 — корпус (станина, ярмо); 2 — обмотка возбуждения; 3 — главный полюс; 4 — якорь; 5 — щетка (показана условно на якоре); 6 — обмотка якоря

**Устройство.** По конструктивному выполнению машина постоянного тока (рис. 1.5) подобна обращенной синхронной машине, у которой обмотка якоря расположена на роторе, а обмотка возбуждения — на статоре.

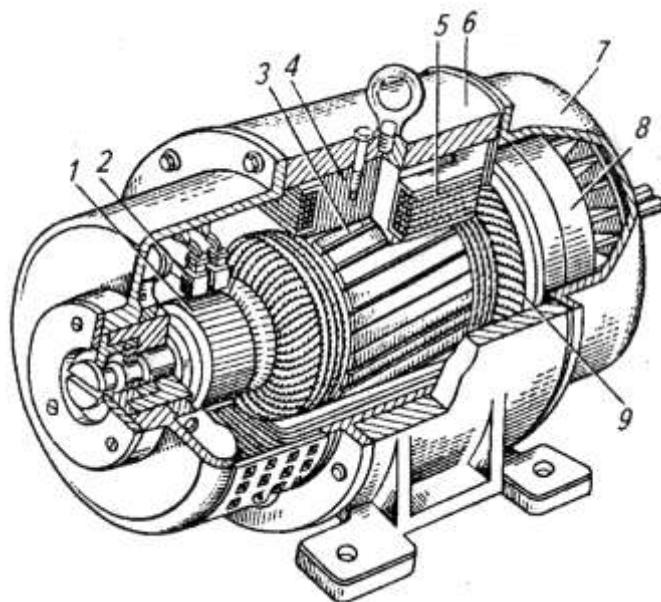


Рис. 1.5. Устройство машины постоянного тока: 1 — коллектор; 2 — щетки; 3 — сердечник якоря; 4 — главный полюс; 5 — катушки обмотки возбуждения; 6 — корпус (станина); 7 — подшипниковый щит; 8 — вентилятор; 9 — обмотка якоря

Основное отличие заключается в том, что машина постоянного тока имеет на якоре коллектор, а на статоре кроме главных полюсов с обмоткой возбуждения добавочные полюсы, которые служат для уменьшения искрения под щетками.

**Статор.** На статоре расположены главные полюсы с катушками обмотки возбуждения и добавочные полюсы (на рис. 1.5. не показаны) с соответствующими катушками. Полюсы крепят болтами к стальному корпусу, который является частью магнитной цепи машины. Главные полюсы выполняют шихтованными (из стальных штампованных листов), а добавочные — массивными или также шихтованными.

По станине и полюсам замыкается постоянный магнитный поток, поэтому выполнение полюсов массивными или из листов определяется в основном удобствами технологии. (стальные листы спрессовывают под давлением и скрепляют заклепками и нажимными щеками, установленными по краям каждого полюса. Шихтованными должны быть только наконечники главных полюсов, так как при вращении зубчатого якоря из-за пульсации магнитного потока в воздушном зазоре в них возникают вихревые токи и потери мощности. Однако по условиям технологии обычно выполняют шихтованным весь полюс. Полюсы крепят к станине болтами; резьбу для болтов нарезают непосредственно в шихтованном сердечнике полюса либо в массивных стальных стержнях, которые вставляют в выштампованные отверстия в полюсах.

Катушки главных и добавочных полюсов изготавливают из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения. Катушки машин малой мощности выполняют из тонкой проволоки; последовательные катушки обмоток возбуждения и добавочных полюсов — из полосовой меди. Расположенную на полюсе обмотку иногда разбивают на несколько катушек (секций) для лучшего ее охлаждения. При секционном выполнении катушек между отдельными секциями устанавливают дистанционные шайбы из изоляционного материала, посредством которых образуются вентиляционные каналы.

**Якорь.** Сердечник якоря, так же как в синхронной машине, собирают из изолированных листов электротехнической стали. Обмотку якоря изготавливают из провода круглого или прямоугольного сечения; обычно она состоит из отдельных, заранее намотанных якорных катушек, которые обматывают изоляционными лентами и укладывают в пазы сердечника якоря. Обмотку выполняют двухслойной; в каждом пазу укладывают две стороны различных якорных катушек — одну поверх другой. Каждая якорная катушка включает в себя несколько секций, концы которых припаиваются к соответствующим коллекторным пластинам; секции могут быть одно- и многовитковыми.

**Коллектор.** Обычно коллектор выполняют в виде цилиндра, собранного из клинообразных пластин твердотянутой меди; между пластинами располагают изоляционные прокладки из слюды или мikanита. Узкие края коллекторных пластин имеют форму ласточкина хвоста; после сборки коллектора их зажимают между корпусом и нажимным фланцем и изолируют манжетами из мikanита. Секции обмотки якоря впаиваются в прорези, имеющиеся в выступающей части коллекторных пластин.

В машинах малой и средней мощности широко применяют коллекторы, в которых медные пластины и мikanитовые прокладки запрессованы в пластмассу. Поверхность собранного коллектора обтачивают на токарном станке и тщательно шлифуют. Чтобы мikanитовые прокладки при срабатывании коллектора не выступали над пластинами и не вызывали вибрации щеток, их профрезеровывают на 0,8...1,5 мм ниже поверхности коллектора.

**Щеточный аппарат.** По цилиндрической части коллектора скользят щетки, установленные в щеткодержателях. Щетки представляют собой прямоугольные бруски, изготовленные путем прессовки и термической обработки из материалов, составленных на основе графита. Они предназначены для соединения коллектора с внешней цепью и прижимаются к поверхности коллектора пружинами.

При вращении якоря щетки сохраняют неизменное положение относительно полюсов машины. Щеткодержатели укрепляют на щеточных пальцах и изолируют от них. Щеточные пальцы, в свою очередь, крепят либо к подшипниковому щиту, либо к

траверсе, которая позволяет при необходимости поворачивать всю систему щеток относительно полюсов машины. В машинах малой мощности часто применяют трубчатые щеткодержатели, устанавливаемые непосредственно в подшипниковом щите.

В зависимости от состава, способа изготовления и физических свойств все щетки делят на шесть основных групп: угольно-графитные, графитные, электрографитированные, медно-графитные, бронзо-графитные и серебряно-графитные. Для каждой машины следует применять щетки только установленной марки, которая выбирается заводом-изготовителем исходя из условий работы машины.

#### 4. Схемы включения и механические характеристики электрических двигателей постоянного тока.

По характеристикам двигателя определяют его рабочие свойства, что дает возможность оценить пригодность двигателя для тех или иных условий работы. К основным характеристикам двигателя постоянного тока относят рабочие и механические характеристики.

Механические характеристики представляют собой зависимости угловой скорости  $\omega$  или частоты вращения от врачающего момента  $M = f(M)$  при  $U = \text{const}$  и  $I_B = \text{const}$ .

Рассмотрим указанные характеристики двигателей постоянного тока с разными схемами возбуждения.

Двигатель с параллельным возбуждением. Схема включения двигателя показана на рисунке 1.5. Обмотка возбуждения двигателя подключена параллельно обмотке якоря, причем ее питание, по существу, независимое. Для регулирования тока возбуждения в цепь обмотки включен регулировочный реостат  $RR_B$ . Пусковой реостат  $RR_n$  включен последовательно с якорем.

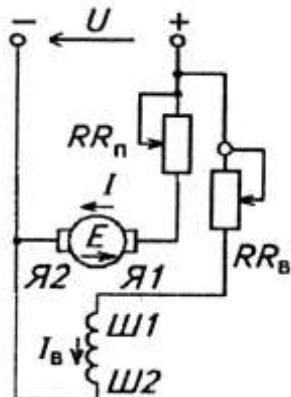


Рис. 1.6. Схема включения двигателя с параллельным возбуждением

Механическая характеристика двигателя  $\omega = f(M)$  или  $n = f(M)$  может быть получена из выражения

$$\omega = \frac{U - IR_a}{C\Phi} = \frac{U}{C\Phi} - \frac{IR_a}{C\Phi} \quad (1.1)$$

Так как  $M = C\Phi I$ , то, подставляя в выражение (1.1) значение тока якоря  $I = M/(C\Phi)$ , получим

$$\omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{MR_a}{C\Phi^2} = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (1.2)$$

где  $\omega_0 = U/(C\Phi)$  — скорость вращения в режиме

идеального холостого хода (без учета момента  $M_0$ , соответствующего потерям мощности при холостом ходе);  $\Delta\omega$  — изменение скорости, вызванное изменением нагрузки на валу двигателя.

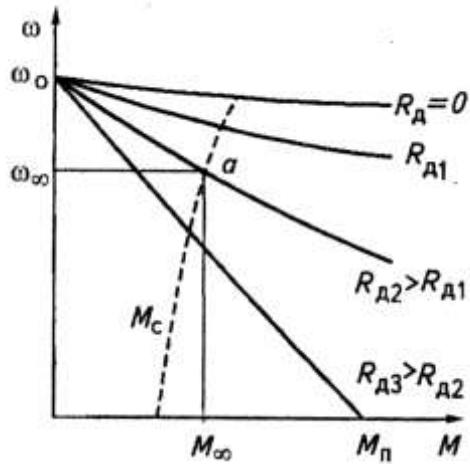


Рис.1.7. Механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением

При неизменном магнитном потоке механическая характеристика двигателя представляет собой прямую линию (рис. 1.7). Если в цепи якоря отсутствуют дополнительные сопротивления, то механическую характеристику двигателя называют естественной. При включении в цепь якоря дополнительного резистора с сопротивлением  $R_d$  может быть получено семейство искусственных характеристик. Естественная механическая характеристика двигателя с параллельным возбуждением весьма жесткая: при изменении нагрузки на валу двигателя его скорость изменяется незначительно.

При работе двигателя на определенной скорости  $\omega_\infty$  он развивает момент  $M_\infty$ , равный моменту сопротивления  $M_c$  механизма, приводимого двигателем во вращение. Таким образом, режим работы двигателя и нагрузки определяют по точке а пересечения механических характеристик двигателя  $M = f(\omega)$  и нагрузки  $M_c = f(\omega)$ . При этом должна обеспечиваться устойчивая работа двигателя с нагрузкой, т. е. при малых кратковременных изменениях момента нагрузки или других возмущениях, приводящих к изменению скорости, система двигатель — нагрузка должна возвращаться к исходному установившемуся режиму. Устойчивость обеспечивается, если  $dM/d\omega < dM_c/d\omega$ . Это условие называют критерием устойчивости работы двигателя. Поэтому при выборе двигателя для той или иной нагрузки следует оценивать устойчивость работы его по указанному критерию.

Двигатель с последовательным возбуждением. Схема включения двигателя показана на рисунке 1.8.

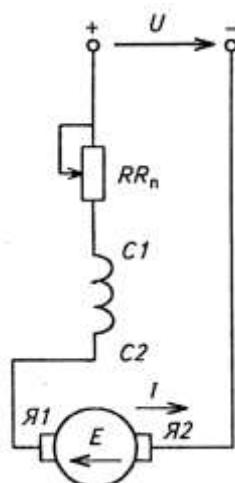


Рис. 1.8. Схема включения двигателя с последовательным возбуждением

Поскольку обмотки двигателя включены последовательно, токи возбуждения и якоря равны между собой:  $I_b = I$ , то магнитный поток в двигателе будет зависеть от нагрузки. При  $I < 0,8I_{\text{ном}}$  магнитная система двигателя не насыщена и магнитный поток пропорционален току:  $\Phi = K_\phi I$ , где  $K_\phi$  — коэффициент пропорциональности. Следовательно, с учетом этого в диапазоне указанных токов нагрузки скоростная характеристика двигателя

$$\omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{I(R_a + R_B)}{C\Phi} = \frac{U}{CK_\phi I} - \frac{R_a + R_B}{CK_\phi} \quad (1.3)$$

будет иметь гиперболический вид.

Зависимость тока от электромагнитного момента в диапазоне токов  $I < 0,8I_{\text{ном}}$  представляют выражением

$$I = \sqrt{\frac{M}{CK_\phi}} \quad (1.4)$$

Подставив выражение (1.4) в формулу (1.3), получим уравнение механической характеристики двигателя

$$\omega = \frac{U}{CK_\phi \sqrt{\frac{M}{CK_\phi}}} - \frac{R_a + R_B}{CK_\phi} \quad (1.5)$$

Как следует из уравнения (1.5), механическая характеристика имеет форму гиперболы. Изменяя сопротивление цепи якоря, можно кроме естественной характеристики 1 (рис. 1.9) получить и искусственные характеристики (кривая 2). Таким образом, механические характеристики двигателя с последовательным возбуждением имеют гиперболический характер, являясь весьма мягкими. Скорость вращения двигателя существенно изменяется при изменениях нагрузки на валу. При малых нагрузках  $I < 0,25I_{\text{ном}}$  угловая скорость двигателя резко возрастает (двигатель «идет вразнос») до значения, опасного для механической прочности. Поэтому работа двигателя при нагрузке на валу менее  $0,25 P_{2\text{ном}}$  недопустима. Двигатели применяют для привода механизмов только при наличии между ними жестких передач (зубчатых, червячных, глухих муфт). Нельзя использовать ременные передачи, так как ремень во время работы может оборваться или соскочить со шкива.

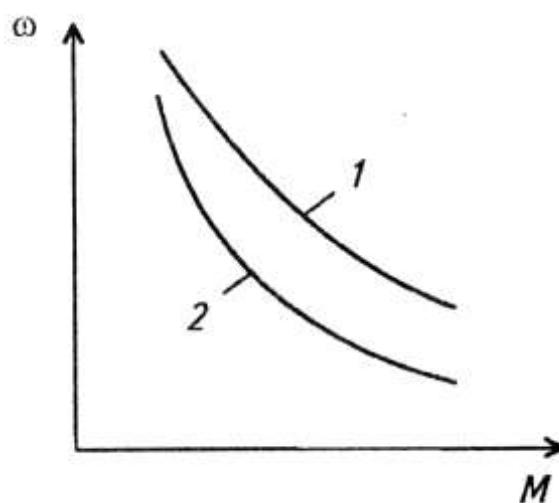


Рис. 1.9. Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением

Двигатели с последовательным возбуждением имеют определенные преимущества перед двигателями с параллельным возбуждением. Так, при одном и том же пусковом токе двигатель с последовательным возбуждением имеет больший пусковой момент: у двигателя с последовательным возбуждением момент пропорционален квадрату тока якоря  $M \propto I^2$ , а у двигателя с параллельным возбуждением момент пропорционален току  $M \propto I$ . Поскольку угловая скорость двигателя с последовательным возбуждением в соответствии с уравнением (1.5)  $\omega \equiv \frac{1}{\sqrt{M}}$ , а у двигателя с параллельным возбуждением  $\omega = \text{const}$ , то мощность на валу двигателей соответственно будет  $P_2 = M\omega \equiv M \cdot \frac{1}{\sqrt{M}} \equiv \sqrt{M}$  и  $P_2 \equiv M$ . Следовательно, при изменении нагрузочного момента на валу в широких пределах мощность  $P_2$ , а следовательно,  $P_1$  и ток  $I$  у двигателя с последовательным возбуждением будут изменяться в меньших пределах, чем у двигателя с параллельным возбуждением. В связи с этим перегрузки для двигателя с последовательным возбуждением менее опасны. Двигатели применяют для электропривода механизмов с тяжелыми условиями пуска и изменением момента в широких пределах (тяговые двигатели на транспорте, крановые двигатели).

Двигатели со смешанным возбуждением. Схема включения двигателя приведена на рисунке 1.10.

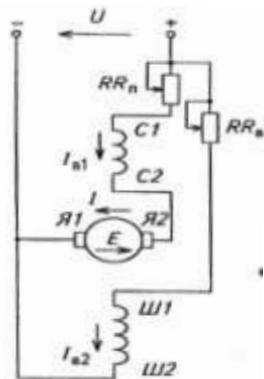


Рис. 1.10. Схема включения двигателя со смешанным возбуждением

Магнитный поток в двигателе создается совместным действием двух обмоток: параллельной и последовательной. Одна из обмоток является основной, а другая — дополнительной. В зависимости от условий работы двигателя основной обмоткой может быть как параллельная, так и последовательная. При этом на ее долю приходится не менее 75 % МДС двигателя.

Если основной обмоткой является последовательная, то она всегда включается с параллельной согласно, так чтобы магнитные потоки обмоток складывались. Если основной является параллельная обмотка, то обмотки включаются встречно.

Механические характеристики двигателя при согласном включении обмоток приведены на рисунке 1.11. В зависимости от соотношений МДС параллельной и последовательной обмоток характеристики могут иметь вид характеристики двигателя с параллельным (кривая 1) или последовательным (кривая 2) возбуждением. Достоинство двигателя со смешанным возбуждением с последовательной основной обмоткой заключается в том, что он, обладая всеми положительными свойствами двигателя с последовательным возбуждением, может работать и на холостом ходу.

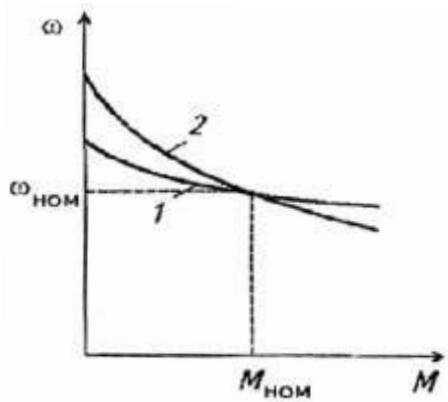


Рис. 1.11. Механическая характеристика двигателя со смешанным возбуждением

### 5. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

Угловая скорость вращения якоря двигателя имеет вид

$$\omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{I \sum R_a}{C\Phi} \quad (1.6)$$

Аналогично получим выражение для частоты вращения двигателя

$$n = \frac{U}{Ce\Phi} - \frac{I \sum R_a}{Ce\Phi} \quad (1.7)$$

Из формулы (1.7) следует три возможных способа регулирования частоты вращения: изменением сопротивления в цепи якоря ( $\sum R_a$ ); магнитного потока ( $\Phi$ ); питающего напряжения ( $U$ ).

Изменение сопротивления цепи якоря. Частоту вращения этим способом регулируют преимущественно у двигателей с параллельным и независимым возбуждением. Для этого в цепь якоря двигателя вводят дополнительный реостат  $R_d$ , секции сопротивлений которого рассчитаны на продолжительную работу под током. Тогда частота вращения будет изменяться в соответствии с выражением

$$n = \frac{U}{Ce\Phi} - \frac{I \sum R_a + R_d}{Ce\Phi} = n_0 - \Delta n \quad (1.8)$$

где  $R_d$  — сопротивление дополнительного реостата;  $n_0 = U/(Ce\Phi)$  — частота вращения при идеальном холостом ходе;  $\Delta n$  — изменение частоты вращения, обусловленное изменением нагрузки на валу.

При неизменном моменте сопротивления нагрузки на валу  $M_c$  будет неизменным и электромагнитный момент  $M$ , а следовательно, и ток  $I$  цепи якоря. Тогда с увеличением сопротивления  $R_d$  Частота вращения двигателя будет уменьшаться (рис. 2.12, а). При данном способе регулирования можно только уменьшать частоту вращения по сравнению с ее значением при работе двигателя на естественной механической характеристике. Диапазон регулирования незначителен ( $n_{max}/n_{min} = 3:1$ ), особенно при малых нагрузках на валу. Кроме того, способ регулирования не экономичен, так как сопровождается большими потерями мощности в сопротивлении  $R_d$ , особенно при малых частотах вращения.

Из выражения (1.8) следует, что

$$\frac{\Delta n}{n_0} = \frac{I \sum R_a + R_D}{U} = \frac{I^2 \sum R_a + R_D}{IU} = \frac{\Delta P_{\text{эл}}}{P_l} \quad (1.9)$$

Откуда

$$\Delta P_{\text{эл}} = P_l \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1.10)$$

Следовательно, чем меньше  $n$ , тем больше электрические потери мощности.

Изменение магнитного потока. Этот способ регулирования частоты вращения наиболее распространен и экономичен. В двигателях с параллельным и независимым возбуждением магнитный поток изменяют путем изменения сопротивления регулировочного реостата в цепи обмотки возбуждения. В двигателях с последовательным возбуждением регулировочным реостатом шунтируют обмотку возбуждения.

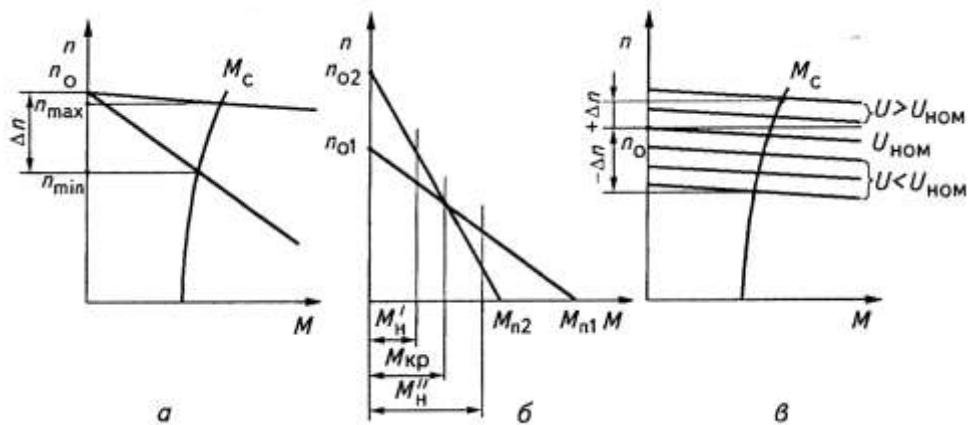


Рис. 1.12. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока изменением сопротивления цепи якоря (а), магнитного потока (б) и значения питающего напряжения (в)

Механическая характеристика двигателя с параллельным возбуждением, практически линейна и может быть построена по двум точкам:

$$n = \frac{U}{Ce\Phi} - \frac{M \sum R_a}{Ce\Phi^2} \quad (1.11)$$

В режиме холостого хода двигателя (первая точка) момент

$M \approx 0$ , а частота вращения  $n_0 = \frac{U}{Ce\Phi}$ . При пуске двигателя (вторая точка)  $n = 0$ , а момент  $M_n = Ce\Phi I_{\text{пуск}}$ , где  $I_{\text{пуск}} = U / \sum R_a$ .

На рисунке 1.12, б показаны две механические характеристики двигателя при разных значениях магнитного потока. С уменьшением потока частота вращения  $n_0$  увеличивается, а пусковой момент  $M_n$  уменьшается. Характеристики пересекаются при некотором значении момента  $M_{\text{кр}}$ . Из рисунка следует, что при значении нагружочного момента  $M'_H < M_{\text{кр}}$  с уменьшением магнитного потока увеличивается частота вращения двигателя, а при  $M''_H > M_{\text{кр}}$  снижается и частота вращения. Обычно у двигателей средней и большой мощности при уменьшении магнитного потока частота вращения увеличивается, а у двигателей малой мощности и микродвигателей, наоборот, уменьшается.

При данном способе регулирования можно изменять частоту вращения только в сторону ее повышения относительно номинального значения. Диапазон регулирования обычно 2 : 1, но может быть и выше. При неизменном моменте нагрузки из-за уменьшения магнитного потока в процессе регулирования увеличивается ток якоря, что отрицательно сказывается на работе двигателя. Преимущество способа заключается в том, что при регулировании отсутствуют потери мощности.

Изменение питающего напряжения. Благодаря этому способу можно регулировать частоту вращения в широких пределах. Действительно, при изменении напряжения на зажимах двигателя частота вращения

$$n = \frac{U}{Ce\Phi} - \frac{I \sum R_a}{Ce\Phi} = n_0 - \Delta n \quad (1.12)$$

будет изменяться лишь за счет изменения составляющей  $n_0$ , а составляющая  $\Delta n$ , обусловленная постоянной нагрузкой на валу двигателя, остается неизменной. Поэтому механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением будут представлять собой семейство параллельных прямых (рис. 1.12, в). Обычно при регулировании «вниз» уменьшаются напряжение и частота вращения вала двигателя.

Преимущества способа: отсутствие дополнительных потерь мощности, связанных с регулированием в большом диапазоне (10:1, 100:1 и выше); возможность регулирования частоты вращения при малых нагрузках. Недостаток способа — необходимость применения специальных устройств для регулирования напряжения.

## 6. Работа двигателей в тормозных режимах.

Электрические двигатели, как правило, используют не только для вращения механизмов, но и для их торможения. Электрическое торможение позволяет быстро остановить механизм или уменьшить его частоту вращения без применения механических тормозов.

Различают три вида электрического торможения двигателей постоянного тока: 1) рекуперативное торможение — генераторное торможение с отдачей электрической энергии в сеть; 2) динамическое или реостатное торможение — генераторное торможение с гашением выработанной энергии в реостате, подключенному к обмотке якоря; 3) электромагнитное торможение — торможение противовключением.

Во всех указанных режимах электромагнитный момент  $M$  действует на якорь в направлении, противоположном  $n$ , т. е. является тормозным.

Рекуперативное торможение. Двигатель с параллельным возбуждением переходит в режим рекуперативного торможения при увеличении его частоты вращения  $n$  выше  $n_0 = U/Ce\Phi$ . В этом случае ЭДС машины становится больше напряжения сети и ток, согласно выражению  $I_a = (E - U)/\sum R_a$ , изменяет свое направление, т. е. двигатель переходит в генераторный режим. В этом режиме машина создает тормозной момент, а выработанная электрическая энергия отдается в сеть и может быть полезно использована.

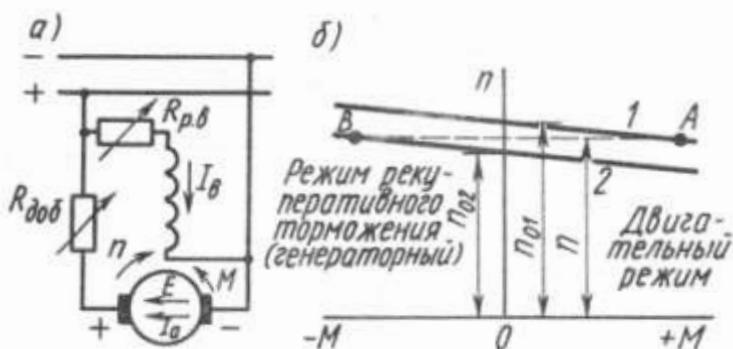


Рис. 1.13. Схема (а) и механические характеристики машины постоянного тока в двигательном и генераторном режимах (б)

В машине с параллельным возбуждением (рис. 1.13 а) механические характеристики генераторного режима являются продолжением механических характеристик двигателевого режима в область отрицательных моментов (рис. 1.13, б). Поэтому переход из двигателевого режима в генераторный может происходить автоматически, если под действием внешнего момента якорь будет вращаться с частотой  $n > n_0$ . Можно перевести машину в генераторный режим и принудительно, если перевести ее на работу с характеристики 1 на характеристику 2, уменьшив по путем увеличения магнитного потока (тока возбуждения) или снижения напряжения, подводимого к двигателю. В этом случае некоторой частоте вращения  $n$  соответствует на характеристике 1 двигательный режим (точка А), а на характеристике 2—режим рекуперативного торможения (точка В).

Двигатели с последовательным возбуждением не могут переходить в режим рекуперативного торможения. При необходимости рекуперативного торможения схему двигателей в тормозном режиме изменяют, превращая двигатели в генераторы с независимым возбуждением.

Двигатели со смешанным возбуждением могут автоматически переходить в генераторный режим, что обусловило их применение в троллейбусах, трамваях и других устройствах с частыми остановками, где двигатель должен обладать мягкой механической характеристикой.

Динамическое торможение. При этом виде торможения двигателя с параллельным возбуждением обмотку якоря отключают от сети и присоединяют к ней реостат  $R_d$  (рис. 1.14, а). При этом машина работает как генератор с независимым возбуждением, создает тормозной момент, но выработанная электрическая энергия бесполезно гасится в реостате. Регулирование тока  $I_a = E / \sum R_a + R_d$ , т. е. тормозного момента  $M$ , осуществляют путем изменения сопротивления  $R_d$ , подключенного к обмотке якоря или ЭДС  $E$  (воздействуют на ток возбуждения). При  $n = 0$  тормозной момент  $M$  равен нулю, следовательно, машина не может быть заторможена в неподвижном состоянии.

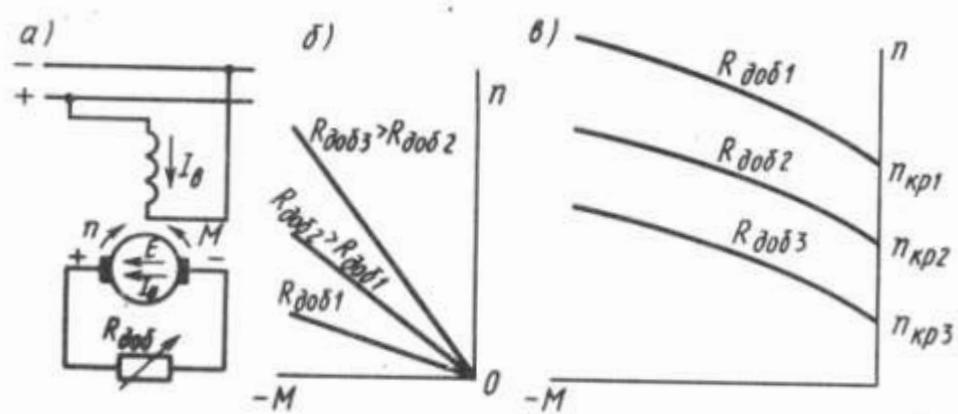


Рис. 1.14. Схема (а) и механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением в режиме динамического торможения (б, в)

Двигатель с последовательным возбуждением может работать в режиме динамического торможения при независимом возбуждении и при самовозбуждении. При независимом возбуждении обмотку возбуждения отключают от обмотки якоря и подключают к питающей сети последовательно с резистором, сопротивление которого выбирают так, чтобы ток возбуждения не превышал номинального значения. При этом механические характеристики двигателя линейные (рис. 1.14, б). При самовозбуждении при переводе машины в генераторный режим необходимо переключить провода, подводящие ток к обмотке возбуждения (рис. 1.15, а, б). Последнее необходимо для того, чтобы при изменении направления тока в якоре (при переходе с двигательного режима в генераторный) направление тока в обмотке возбуждения оставалось неизменным и создаваемая этой обмоткой МДС  $F_v$  совпадала по направлению с МДС  $F_{ost}$  от остаточного магнетизма. В противном случае генераторы с самовозбуждением размагничиваются.

Механические характеристики двигателя при самовозбуждении нелинейны (рис. 1.14, в). Самовозбуждение возможно только при частоте вращения, большей некоторого критического значения  $n_{kp}$ , при котором вольт-амперная характеристика сопротивления цепи якоря располагается по касательной к зависимости  $E = f(n)$ , т.е. при увеличении  $R_d$  оно возможно при более высоких частотах вращения ( $n_{kp1} > n_{kp2} > n_{kp3}$ ).

Двигатель со смешанным возбуждением также может работать в режиме динамического торможения.

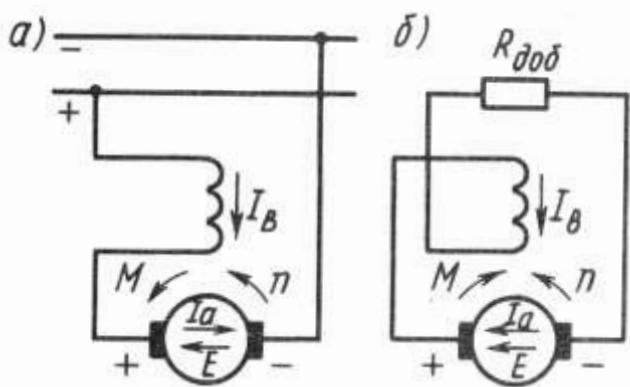


Рис. 1.15. Схемы машины с последовательным возбуждением в режимах двигательном (а) и динамического торможения (б)

**Электромагнитное торможение.** В этом режиме изменяют направление электромагнитного момента  $M$ , сохраняя неизменным направление тока из сети, т. е. момент делают тормозным. Последнее осуществляют так же, как и при изменении направления вращения двигателя — путем переключения проводов, подводящих ток к обмотке якоря (рис. 1.16, а) или к обмотке возбуждения. Чтобы ограничить значение тока в этом режиме, в цепь обмотки якоря вводят добавочное сопротивление  $R_d$ . Регулирование тока  $I_a = U + E / \sum R_a + R_d$ , т. е. тормозного момента  $M$ , осуществляют путем изменения сопротивления  $R_d$  или ЭДС  $E$  (тока возбуждения  $I_b$ ). Механические характеристики в этом режиме для двигателей с параллельным и последовательным возбуждением показаны на рис. 1.16, б, в.

С энергетической точки зрения электромагнитное торможение является наиболее невыгодным, поскольку машина потребляет как механическую, так и электрическую энергию, которые гасятся в обмотке якоря и во включенном в ее цепь реостате.

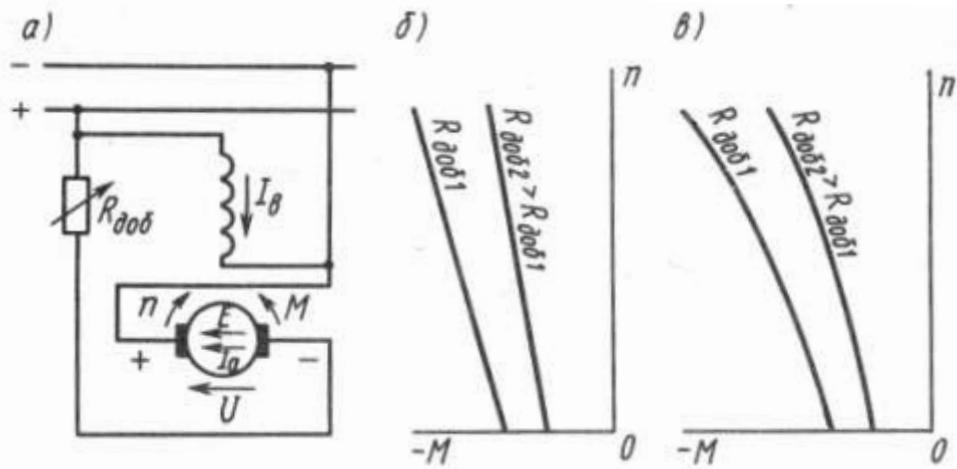


Рис. 1.16. Схема (а) и механические характеристики двигателей в режиме электромагнитного торможения (б, в)

Однако при этом способе можно получать большие тормозные моменты при низких частотах вращения и даже при  $n = 0$ , поскольку в этом случае ток  $I_a = U / \sum R_a + R_d$ .

## 1.2 Лекция № 2. (2 часа)

Тема: «Трёхфазный асинхронный электродвигатель».

### 1.2.1. Вопросы лекции

1. Устройство и принцип действия трёхфазного асинхронного электродвигателя.  
Скольжение
2. Схемы включения трёхфазных асинхронных электродвигателей
3. Механическая характеристика. Уравнение Клосса
4. Построение механической характеристики асинхронного двигателя по каталогным данным

### 1.2.2 Краткое содержание вопросов

1. Устройство и принцип действия трёхфазного асинхронного электродвигателя.  
Скольжени

Устройство. Конструктивно асинхронный двигатель состоит из неподвижного статора и размещенного внутри его вращающегося ротора (рис. 2.1). Их поверхности разделены равномерным воздушным зазором 0,2...1,5 мм.

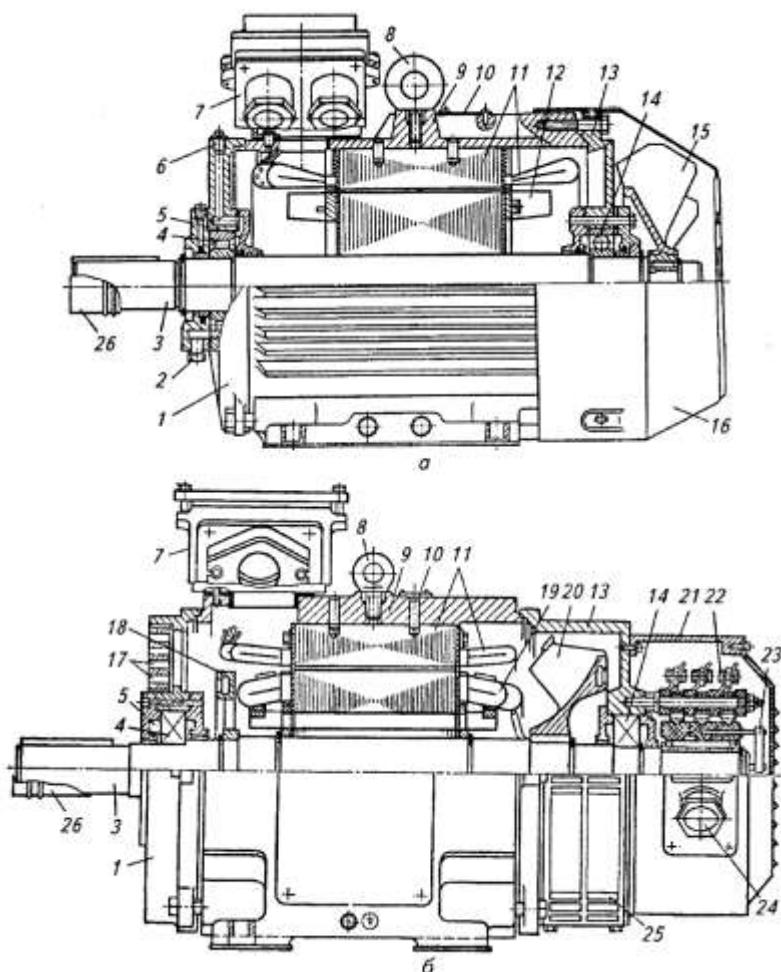


Рис. 2.1. Схемы асинхронных двигателей серии 4А:  
а — короткозамкнутый степени защиты 1P44 сельскохозяйственного исполнения  
(4A...СУ1);

6 — с контактными кольцами степени защиты 1Р23 (4АНК...); 1 и 13— подшипниковые щиты; 2— торцевое окно в щите; 3 — вал; 4— роликовый подшипник; 5— камера для смазки; 6— масленка; 7— коробка выводов; 8— рым; 9—корпус (станина); 10 —паспортная табличка; 11— статор; 12 и 19— короткозамкнутый и фазный роторы; 14 — упорный шариковый подшипник; 15—центробежный вентилятор наружного обдува; 16— кожух вентилятора; 17— пробки для смены смазки; 18— балансировочное кольцо; 20 — центробежный вентилятор; 21 — короб с контактными кольцами; 22 — токосъем; 23 — токопровод к контактному кольцу; 24— штуцер; 25— отверстия (жалюзи) для выхода охлаждающего воздуха; 26—упаковочная бумага

Статор состоит из корпуса (станины), внутри которого встроен сердечник с обмоткой. Сердечник в виде полого цилиндра собирают из отдельных изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,35...0,5 мм, которые скрепляют скобами, шпильками или сварным швом. Листы имеют кольцевую форму с пазами по окружности внутреннего диаметра, что позволяет создать на внутренней поверхности сердечника при его сборке продольные пазы. В пазы сердечника укладывают обмотку. Последняя состоит из отдельных секций (катушек). Начала и концы обмоток фаз трехфазного двигателя обозначают буквами русского алфавита соответственно С1—С4, С2—С5 и С3—С6 и выводят на зажимы коробки выводов. Выводных концов может быть 6 или 3, а схема соединения обмоток — звезда или треугольник. У двигателей, разработанных после 01.01.1987 г. (серии 5А, RA), начала и концы обмоток фаз статора обозначают буквами латинского алфавита U1 – U2; V1 – V2; W1 – W2.

Роторы асинхронных двигателей бывают двух видов: с коротко-замкнутой и фазной обмотками. В зависимости от этого и сами асинхронные двигатели называют двигателями с коротко-замкнутым или фазным ротором.

Сердечник ротора выполняют из неизолированных листов электротехнической стали. В них выштамповывают паз для обмотки и отверстие для вала. В фазных роторах в пазы укладывают обмотку, аналогичную статорной обмотке и образующую такое же число полюсов. Концы этой обмотки обычно соединяют в звезду, а начала выводят на три медных контактных кольца, на которые накладывают щетки. При таком исполнении ротора можно через щеточные контакты включать в цепь ротора трехфазный реостат для изменения силы тока и момента двигателя при пуске или для регулирования частоты вращения. Наиболее распространены ко-роткозамкнутые роторы. В таком роторе обмотка выполнена в виде так называемой «беличьей клетки». Ее выполняют путем заливки под давлением в пазы алюминиевых сплавов. При этом одновременно отливают стержни (проводники), лежащие в пазах, короткозамыкающие их кольца и лопасти для вентиляции.

На корпусе двигателя прикреплена табличка, на которой приведены номинальные данные двигателя, в том числе указаны схема соединения обмоток статора и соответствующее ей номинальное напряжение питающей сети, например схема Д/У, номинальное напряжение 220/380 В. Последнее означает, что при напряжении сети 220 В обмотку статора соединяют треугольником, а при напряжении 380 В — звездой.

**Принцип действия.** Асинхронные машины — это электрические машины переменного тока, у которых в установившемся режиме работы магнитное поле, участвующее в процессе преобразования энергии, и проводники пересекающиеся этим полем, имеют разные частоты вращения.

Асинхронные машины преимущественно используют в качестве электрических двигателей. Асинхронные электродвигатели служат для привода различных механизмов, преобразуя электрическую энергию в механическую. Их преимущества — простота конструкции, технологичность изготовления, высокая надежность при эксплуатации и др.

В качестве генераторов электрической энергии асинхронные машины не получили распространения из-за сложности их возбуждения и регулирования напряжения. Генераторный режим асинхронных машин используют в основном для их торможения, когда они нормально работают двигателями, например в крановых механизмах.

Принцип действия асинхронных машин, как и других электрических машин, основан на явлении электромагнитной индукции и возникновении электромагнитных сил. В асинхронных машинах основное магнитное поле создается МДС обмотки статора. Обмотку статора, например трехфазного асинхронного двигателя, выполняют в частном случае в виде трех катушек, смещенных в пространстве одна относительно другой на 120° и соединенных звездой или треугольником. При питании обмотки от сети трехфазного синусоидального тока возникает вращающееся магнитное поле с частотой вращения

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (2.1)$$

Где  $f_1$  - частота питающего напряжения;  $p$  - число пар полюсов магнитного поля, определяемое числом катушек обмотки.

Вращающееся магнитное поле пересекает проводники ротора и в соответствии с явлением электромагнитной индукции индуцирует в них ЭДС  $E_2$ , направление которой определяют по правилу правой руки (рис. 2.2.).

Под действием ЭДС  $E_2$  в короткозамкнутой обмотке ротора будут протекать токи  $I_2$ , которые вследствие индуктивности обмотки отстают от ЭДС  $E_2$  на некоторый угол  $\psi_2$ . На проводники ротора с током  $I_2$ , находящиеся в магнитном вращающемся поле статора, будут действовать электромагнитные силы  $F$ , направление которых определяют по правилу левой руки. Образуемая от сил, приложенных ко всем проводникам, результирующая пара сил создает электромагнитный вращающий момент, увлекающий ротор за вращающимся магнитным полем, т. е.

$$M = C_m \Phi_m I_2 \cos \psi_2 \quad (2.2)$$

где  $C_m$  — коэффициент;  $\Phi_m$  — амплитудное значение магнитного потока вращающегося поля статора;  $I_2 \cos \psi_2$  — активная составляющая тока ротора.

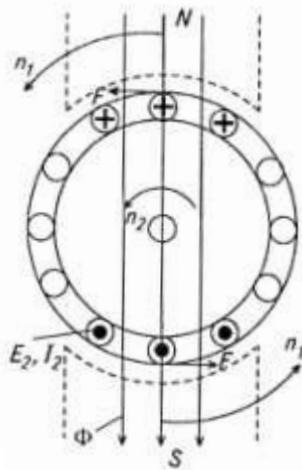


Рис. 2.2. К принципу действия асинхронного двигателя.

Ротор приходит во вращение, и его установившаяся частота вращения  $n_2$  будет определяться из условия равновесия электромагнитного момента  $M$  и тормозного момента, создаваемого силами трения, и приводимым во вращение рабочим механизмом.

Частота вращения ротора  $n_2$  принципиально всегда меньше частоты вращения магнитного поля  $n_1$ , так как при  $n_1 = n_2$  проводники ротора не будут пересекаться магнитным полем, в них не будут индуцироваться ЭДС, токи и не создается электромагнитный вращающий момент. Таким образом, работоспособность асинхронного

двигателя возможна только в случае, когда  $n_2 \neq n_1$ . Это и определило название машин - асинхронные, т.е. имеющие несинхронное (несовпадающее) вращение магнитного поля статора и ротора. Частоту вращения магнитного поля  $n_1$  называют синхронной частотой вращения.

Скольжение. Разность частот вращения магнитного поля и ротора, выраженная в долях или процентах от частоты вращения магнитного поля, называют скольжением:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; S\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Из выражения (2.3) частоту вращения ротора определяют как

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - S); n_2 = n_1 \cdot \frac{1 - S\%}{100} \quad (2.4)$$

При неподвижном роторе, например в момент пуска, скольжение  $S = 1$ , а при номинальной нагрузке двигателя  $S_{\text{ном}} = 0,025 \dots 0,07$ . Скольжение, равное  $S = 0$ , в двигательном режиме недостижимо, но принципиально двигательный режим соответствует диапазону скольжений  $0 \leq S \leq 1$ .

При вращении ротора с помощью приводного двигателя с  $n_2 > n_1$  асинхронная машина переходит в генераторный режим и  $S < 0$ .

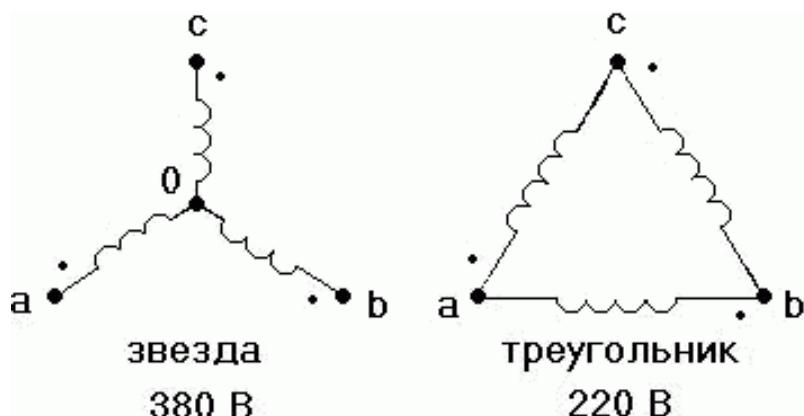
Асинхронная машина может быть использована также в режиме электромагнитного тормоза. В этом случае направления вращения ротора и магнитного поля противоположны, т. е.  $S > 1$ .

## 2. Схемы включения трёхфазных асинхронных электродвигателей.

Всякий асинхронный трехфазный двигатель рассчитан на два номинальных напряжения трехфазной сети 380 /220 - 220/127 и т. д. Наиболее часто встречаются двигатели 380/220В. Переключение двигателя с одного напряжения на другое производится подключением обмоток «на звезду» - для 380 В или на «треугольник» - на 220 В. Если у двигателя имеется колодка подключения, имеющая 6 выводов с установленными перемычками, следует обратить внимание в каком порядке установлены перемычки. Если у двигателя отсутствует колодка и имеются 6 выводов - обычно они собраны в пучки по 3 вывода. В одном пучке собраны начала обмоток, в другом концы (начала обмоток на схеме обозначены точкой)

В данном случае «начало» и «конец» - понятия условные, важно лишь чтобы направления намоток совпадали, т. е. на примере «звезды» нулевой точкой могут быть как начала, так и концы обмоток, а в «треугольнике» - обмотки должны быть соединены последовательно, т. е. конец одной с началом следующей. Для правильного подключения на «треугольник» нужно определить выводы каждой обмотки, разложить их попарно и подключить по след. схеме:

Если развернуть эту схему, то будет видно, что катушки подключены «треугольником».



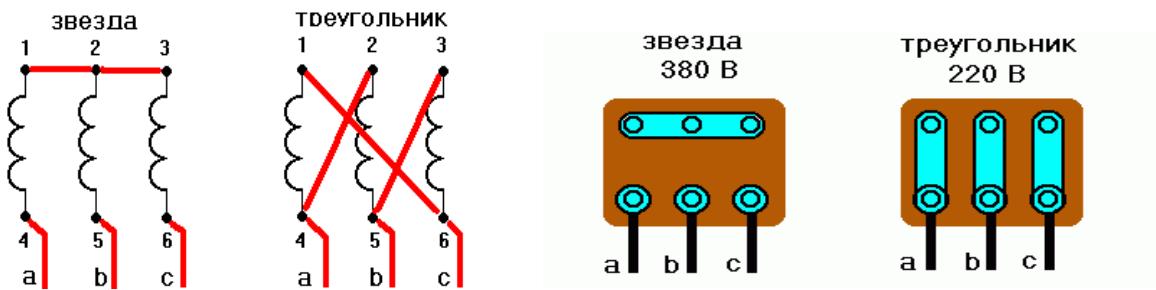


Рис. 2.3. Схемы включения трёхфазного двигателя

Если у двигателя имеется только 3 вывода, следует разобрать двигатель: снять крышку со стороны колодки и в обмотках найти соединение трёх обмоточных проводов (все остальные провода соединены по 2). Соединение трёх проводов является нулевой точкой звезды. Эти 3 провода следует разорвать, припаять к ним выводные провода и объединить их в один пучок. Таким образом мы имеем уже 6 проводов, которые нужно соединить по схеме треугольника.

### 3. Механическая характеристика. Уравнение Клосса

Механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой зависимость частоты вращения ротора от вращающего момента:  $\pi_2 = f(M)$  или наоборот:  $M = f(\pi_2)$ . Иногда ее представляют как зависимость момента от скольжения  $M = f(s)$ .

Механическую характеристику в виде графической зависимости  $M = f(s)$  можно получить из круговой диаграммы или в виде аналитической зависимости из рассмотрения, например, Г-образной схемы замещения асинхронного двигателя. Из указанной схемы электромагнитная мощность, передаваемая со статора на ротор,

$$P_{\text{эм}} = m_1 \cdot I'_2 \cdot \frac{R'_2}{s} \quad (2.5)$$

Приведенный ток ротора

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R'_1 + R'_2/s^2 + X'_1 + X'_2/s^2}} \quad (2.6)$$

Подставив выражение (2.6) в уравнение (2.5), получим

$$P_{\text{эм}} = \frac{m_1 U_1^2 R'_2 / s}{\sqrt{R'_1 + R'_2/s^2 + X'_1 + X'_2/s^2}} \quad (2.7)$$

и электромагнитный момент

$$M = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega_1} = \frac{m_1 U_1^2 R'_2 / s}{\omega_1 \left[ \sqrt{R'_1 + R'_2/s^2 + X'_1 + X'_2/s^2} \right]} \quad (2.8)$$

Эта характеристика расписывается уравнением Клосса.

Из этой формулы видно, что момент зависит от конструктивных параметров двигателя, частоты и напряжения сети. Каждому значению скольжения (частоте вращения ротора) соответствует свое значение вращающего момента. И наоборот: каждому значению момента нагрузки соответствует своя частота вращения ротора. Изменить характеристику, согласно формуле Клосса, можно, например, изменяя напряжение сети.

Поскольку в выражении (2.8) все величины, кроме скольжения  $s$ , постоянны, то оно и будет являться аналитической зависимостью  $M = f(s)$ , т. е. механической характеристикой асинхронной машины. Графическая характеристика показана на рисунке 2.4.

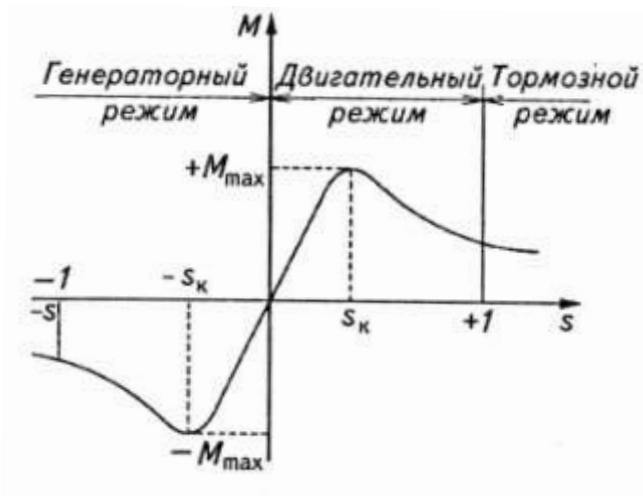


Рис.2.4. Механическая характеристика асинхронной машины

Вид кривой  $M=f(s)$  объясняют так. Как уже отмечалось, электромагнитный момент пропорционален магнитному потоку  $\Phi_t$  и активной составляющей тока ротора  $I_2 \cos \Psi_2$  по выражению (2.2). При постоянном значении напряжения  $U_1$  величина потока  $\Phi_t$  также постоянная, поэтому характер изменения момента будет определяться изменением  $I_2 \cos \Psi_2$ . При скольжении  $s=0$  ток в роторе  $I_2=0$  и момент  $M=0$ . С ростом скольжения ток  $I_2$  увеличивается [см. выражение (2.6.)],  $\cos \Psi_2$  уменьшается из-за повышения частоты тока в роторе  $f_2=f_1 s$ , следовательно, из-за увеличения индуктивного сопротивления  $X_2=2\pi f_2 L_2$ . При скольжении  $s < s_k$  увеличение тока  $I_2$  преобладает над уменьшением  $\cos \Psi_2$  и момент  $M$  возрастает, а при  $s > s_k$  — наоборот, и момент снижается. Таким образом, при скольжении  $s_k$ , называемом критическим скольжением, момент имеет максимальное значение  $M_{max}$ .

Для определения критического скольжения необходимо взять первую производную от выражения (2.8) и приравнять ее к нулю:  $dM/ds=0$ . Решая полученное уравнение относительно  $s$ , получим

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_1' + X_2'^2}} \quad (2.9)$$

или, пренебрегая сопротивлением  $R_1$  из-за его малости ( $R_1 \ll X_1 + X_2'$ ), получим упрощенное выражение критического скольжения

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{X_1 + X_2'} \quad (2.10)$$

Подставив выражение (2.9) в формулу (2.8), определим максимальный момент

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 \left[ \pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + K_1 + X_2'^2} \right]} \quad (2.11)$$

или приближенно с учетом  $R_1=0$

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 K_1 + X_2'} \quad (2.12)$$

Знак «+» относится к двигательному режиму, а знак «-» - к генераторному.

На механической характеристике асинхронного двигателя (рис. 2.5) можно отметить следующие характерные точки: точка А ( $s=1, M_n$ ) соответствует режиму работы с неподвижным ротором, где  $M_n$  — пусковой момент двигателя; точка В ( $s_k, M_{\max}$ ); точка С ( $s_{nom}, M_{nom}$ ), где  $M_{nom}$  — номинальный момент двигателя, который он развивает при номинальной нагрузке на валу. В каталожных данных на асинхронные двигатели приведены кратности указанных моментов относительно номинального значения, например, для двигателей серии АИР кратность пускового момента  $K_n = M_n/M_{nom} = 1,3...2,3$ ; кратность максимального момента  $K_m = M_{\max}/M_{nom} = 1,9...3,0$ .

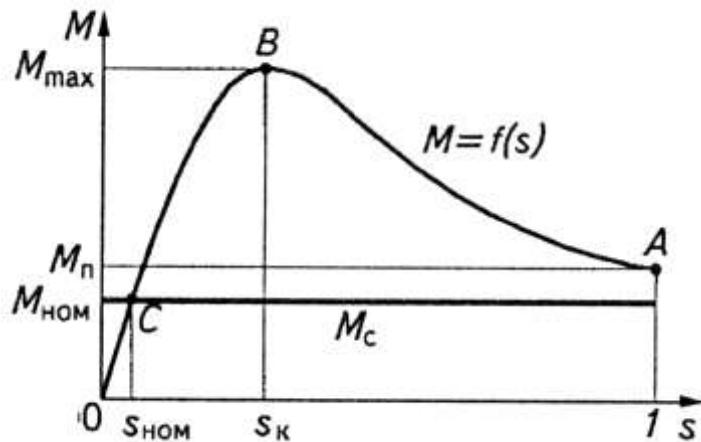


Рис. 2.5. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Квадратичная зависимость момента асинхронных двигателей от напряжения  $M \equiv U_1^2$  является их недостатком, так как при незначительном снижении напряжения момент существенно изменяется. Момент при изменении напряжения

$$M = M_{nom} \left( \frac{U_1}{U_{1nom}} \right)^2 \quad (2.13)$$

Если, например, напряжение снизится на 30%, т.е.  $U_1 = 0,7U_{1nom}$ , то

$$M = M_{nom} 0,7^2 = 0,49M_{nom} \quad (2.14)$$

т. е. изменится более чем в 2 раза.

Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения показаны на рисунке 2.6, а. Изменение напряжения влияет не только на значения моментов, но и на значение частоты вращения двигателя. При снижении напряжения критическое скольжение в соответствии с выражением (2.9) остается неизменным, а скольжение, характеризующее режим работы двигателя, увеличивается ( $s_2 > s_1$ ). При некотором критическом напряжении  $U_{1kp}$  скольжение двигателя станет равным критическому значению, а развиваемый момент  $M_1 = M_{\max} = M_c$ .

Тогда

$$U_{1kp} \approx \frac{1}{m_1} \sqrt{2\omega_1 X_1 + X'_2 M_c} \quad (2.15)$$

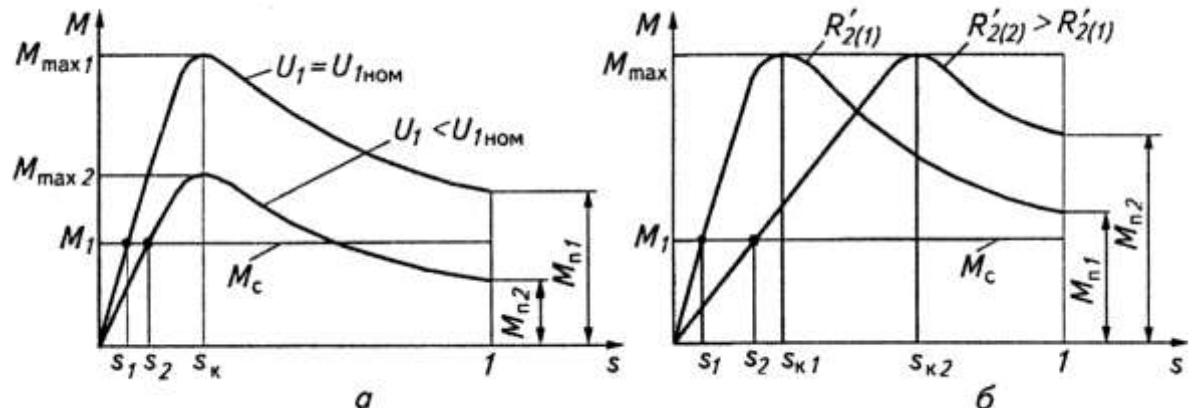


Рис. 2.6. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении: а – напряжения; б – активного сопротивления цепи ротора.

При дальнейшем незначительном снижении напряжения двигатель не в состоянии будет преодолеть момент сопротивления рабочей машины  $M_c$  и остановится. Такой исход режима называют иногда «опрокидыванием» двигателя.

Вид механической характеристики двигателя определяет также значение активного сопротивления цепи ротора  $R'_2$ . Как следует из выражений (2.11) и (2.9), максимальный момент двигателя не зависит от величины сопротивления  $R'_2$ , а критическое скольжение пропорционально этому сопротивлению. Следовательно, если в двигателе увеличить сопротивление  $R'_2$ , то его характеристики в области скольжений  $0 \leq s \leq s_k$  будут более пологими (рис. 2.6, б). Влияние активного сопротивления цепи ротора оказывается также на значениях пускового момента и скольжении установившегося режима работы. С увеличением  $R'_2$  пусковой момент и скольжение увеличиваются. Однако при этом возрастают электрические потери мощности в роторе и снижается коэффициент полезного действия двигателя.

Пуск двигателя возможен, если его пусковой момент  $M_p$  больше момента  $M_c$ , равного сумме моментов холостого хода двигателя и сопротивления рабочей машины, приводимой во вращение. Под действием пускового момента ротор двигателя начинает вращаться, его частота вращения растет, а момент изменяется в соответствии с механической характеристикой. Установившийся режим наступает, когда момент двигателя уравновешивается противодействующим моментом, например в точке С (см. рис. 2.5). При этом  $M_{\text{ном}} = M_c$  и двигатель имеет частоту вращения со скольжением  $s_{\text{ном}}$ .

Если при кратковременных нарушениях равновесия  $M_{\text{ном}} = M_c$  из-за изменения напряжения питающей сети или момента сопротивления  $M_c$  двигатель способен восстанавливать установившуюся частоту вращения, то он характеризуется устойчивостью работы. Из механической характеристики (см. рис. 2.5) следует, что устойчивая работа двигателя будет на участке ОВ. Действительно, при работе на этом участке всякое изменение, например, момента  $M_c$  сопровождается появлением

избыточного момента  $M_{изб} = M - M_c$  на валу двигателя, после чего вновь восстанавливается установившийся режим работы с  $M_{изб} = 0$  и постоянной частотой вращения. Если, например,  $M_c > M$ , то избыточный момент будет тормозным. Это приведет к увеличению скольжения и в соответствии с механической характеристикой к увеличению момента двигателя до значения, когда  $M = M_c$ .

Таким образом, устойчивая работа асинхронного двигателя с нагрузкой  $M_c = \text{const}$  будет при скольжениях  $s < s_k$  моментах  $M \ll M_{\max}$ . Работа двигателя на участке АВ неустойчива и поэтому не может быть осуществлена. Отношение  $K_m = M_{\max}/M_{\text{ном}}$  называют перегрузочной способностью двигателя.

4. Построение механической характеристики асинхронного двигателя по каталожным данным.

Для построения механической характеристики асинхронного двигателя используют приближенные аналитические выражения механической характеристики, приняв в выражении (3.8) сопротивление обмотки статора равным  $R_1 = 0$ . Упрощенное выражение для характеристики может быть записано в виде

$$\frac{M}{M_{\max}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (2.16)$$

В каталожных данных асинхронных двигателей приведены номинальные мощность  $P_{\text{ном}}$  и частота вращения  $n_{\text{ном}}$ , а также кратности  $K_m = M_{\max}/M_{\text{ном}}$  и  $K_n = M_n/M_{\text{ном}}$ . Используя эти данные, можно найти:

- номинальный момент  $M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}}$ ;
- номинальное скольжение  $s_{\text{ном}} = (n_1 - n_{\text{ном}})/n_1$ ;
- пусковой момент  $M_n = K_n M_{\text{ном}}$ ;
- максимальный момент  $M_{\max} = K_m M_{\text{ном}}$ ;
- критическое скольжение

$$s_k = s_{\text{ном}} \sqrt{K_m^2 - 1} \quad (2.17)$$

Таким образом, находят характерные точки механической характеристики: А ( $s = 1, M_n$ ); В ( $s_k, M_{\max}$ ); С ( $s_{\text{ном}}, M_{\text{ном}}$ ). Реально на участке АВ механической характеристики (см. рис. 2.5) имеется одна характерная точка с минимальным моментом. В каталогах для указанной точки приведена кратность  $K_{\min} = M_{\min}/M_{\text{ном}}$ .

Подставив в выражение любое значение скольжения из диапазона  $0 \leq s \leq 1$ , находят соответствующий ему момент двигателя, что даёт возможность построить механическую характеристику  $M=f(s)$ .

Расчёты существенно упрощаются, если момент определять в относительных единицах  $M_* = M/M_{\max}$ . Тогда уравнение механической характеристики принимает вид

$$M_* = 2 \left( \frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} \right) \quad (2.18)$$

### 1.3. Лекция № 3. (2 часа)

**Тема:** «Тормозные режимы трёхфазного асинхронного электродвигателя».

#### 1.3.1. Вопросы лекции

1. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя
2. Устройство, схема включения и принцип действия однофазного асинхронного электродвигателя. Механическая характеристика
3. Работа трёхфазного асинхронного двигателя от однофазной сети
4. Тормозные режимы

### **1.3.2. Краткое содержание вопросов**

1. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя

Частота вращения ротора асинхронного двигателя

$$n_2 = n_1 \frac{f_1}{p} = \frac{60f_1}{p} \quad (3.1)$$

Из выражения (3.1) следуют три принципиально возможных способа регулирования  $n_2$  т. е. изменением:

- частоты  $f_1$  напряжения, подводимого к статору двигателя;
- числа пар полюсов  $p$  обмотки статора;
- скольжения  $s$  двигателя.

Частотное регулирование. Для реализации этого способа регулирования частоты вращения необходимы источник питания с регулируемой частотой  $f_1$  или преобразователь частоты, включаемый между питающей сетью и двигателем.

Так как

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 f_1 \omega_m K_{o61}$$

то при постоянном значении напряжения  $U_1$  изменение частоты  $f_1$  будет вызывать изменение магнитного потока. Это, в свою очередь, связано с изменением тока намагничивания, насыщения магнитной цепи и в целом приводит к ухудшению рабочих характеристик двигателя. С изменением частоты  $f_1$  будет изменяться и максимальный врачающий момент двигателя в соответствии с выражением (2.12). Поэтому для обеспечения постоянства перегрузочной способности  $K_i = \frac{I_{max}}{M_{nm}}$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi$  и КПД  $\eta$  двигателя необходимо одновременно с изменением частоты  $f_1$  изменять и напряжение питания  $U_1$ . Все это усложняет как выполнение источника питания, так и сам процесс регулирования. Однако в ряде случаев частотное регулирование наиболее приемлемо, так как с помощью него можно плавно и в широком диапазоне изменять частоту вращения с обеспечением жесткости механической характеристики и высокой перегрузочной способности.

Регулировать частоту вращения можно при постоянном моменте нагрузки на валу  $M_n = \text{const}$  или когда момент нагрузки изменяется с изменением частоты вращения. В первом случае пропорционально изменению частоты вращения будет изменяться потребляемая двигателем мощность ( $P_{em} = M_n \omega_1$ ), а во втором мощность остается неизменной ( $P_{em} = \text{const}$ ).

Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов.

Асинхронные двигатели с изменением числа пар полюсов обмотки статора выполняют короткозамкнутыми, так как только при такой обмотке можно получить число полюсов, равное числу полюсов обмотки статора. Этот способ основан на изменении синхронной частоты вращения магнитного поля статора  $\pi_1 = 60f_1/p$ . Однако при этом возможно ступенчатое регулирование частоты вращения.

Для изменения числа пар полюсов на статоре располагают две обмотки, не связанные электрически друг с другом и имеющие разное число пар полюсов, например  $p_1$  и  $p_2$ . При подключении одной из обмоток к питающей сети, например, с числом пар полюсов  $p_1$  двигатель будет иметь синхронную частоту вращения  $\pi_1 = 60f_1/p$ . Вторая обмотка остается обесточенной.

Путем переключения катушечных групп одной обмотки, уложенной в пазы статора, можно получить разное число пар полюсов. Принцип преобразования четырехполюсной обмотки в двухполюсную показан для одной фазы на рисунке 3.3. При последовательном и согласном соединении двух катушечных групп  $A_1 - X_1$  и  $A_2 - X_2$  фазной обмотки ими создается четырехполюсное магнитное поле, а при последовательном встречном соединении — двухполюсное. Соответственно указанным соединениям частота вращения поля  $\pi_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$  или  $n_1 = 3000 \text{ мин}^{-1}$ .

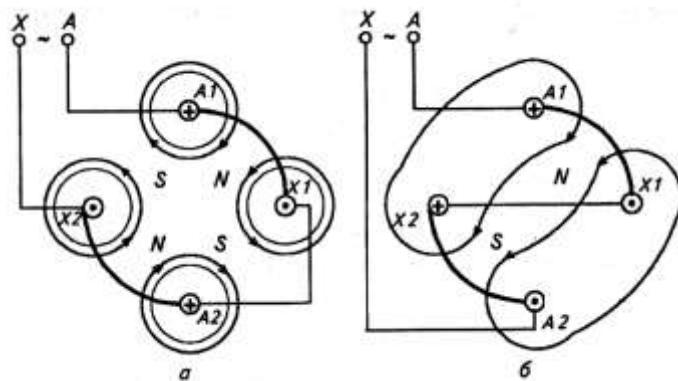


Рис. 3.3 Схема переключения обмотки одной фазы статора для изменения числа полюсов:

а –  $2p=4$ ; б –  $2p=2$

В номенклатуре единой серии асинхронных двигателей 4А выпускают модификации многоскоростных двигателей, предназначенных для работы на двух, трех и четырех скоростях. Двухскоростные двигатели выполняют с одной полюсно переключаемой обмоткой статора, а трех- и четырехскоростные — с двумя полюсно переключаемыми обмотками.

Регулирование частоты вращения изменением скольжения. Этот способ регулирования является наиболее простым по сравнению с предыдущими способами. Изменение частоты вращения двигателя возможно только в сторону ее уменьшения, т. е. связано с увеличением скольжения. При этом в соответствии с выражениями (3.6) увеличиваются ток  $I_2$  в обмотке ротора и электрические потери  $\Delta P_{32}$ , что приводит к уменьшению КПД двигателя.

Для уменьшения частоты вращения двигателя с короткозамкнутым ротором уменьшают напряжение на его зажимах. Развиваемый двигателем момент уменьшается пропорционально квадрату напряжения, и соответственно изменяется вид механической характеристики (рис. 3.4, а). При постоянном значении момента сопротивления рабочей машины  $M_c$  скольжение двигателя увеличивается до значения  $s_i$ , а частота вращения падает. Очевидно, что регулирование возможно в диапазоне изменения скольжения от номинального значения  $s_{\text{ном}}$  до критического  $s_k$ . Некоторое увеличение диапазона изменения частоты вращения обеспечивается при использовании двигателей с повышенным скольжением.

Способ регулирования применяют только для двигателей малой мощности и микромашин. Для его реализации используют регулировочные автотрансформаторы или управляемые полупроводниковые регуляторы напряжения.

Для изменения скольжения двигателя с фазным ротором включают реостат в цепь ротора. Реостат должен быть рассчитан на длительную работу. Если двигатель работает

при нагрузке  $M_c$  на естественной характеристике, то его установившийся режим характеризуется скольжением  $s_e$  (рис. 3.4, б). Для получения требуемой частоты вращения, соответствующей скольжению  $s_i$ , при том же моменте в цепь ротора вводят дополнительное сопротивление

$$R_d = R_2 \left( \frac{s_u}{s_e} - 1 \right) \quad (3.2)$$

где  $R_2$  — сопротивление ротора, определяемое из паспортных данных двигателя.

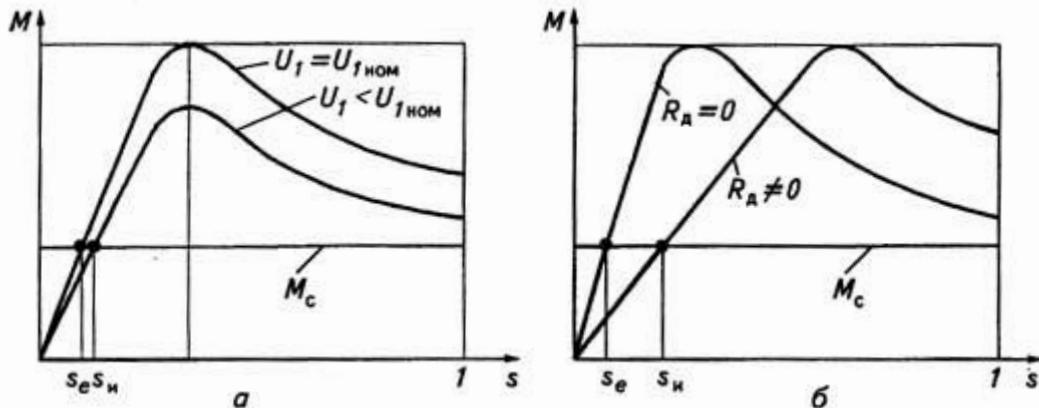


Рис. 3.4. Регулирование частоты вращения изменением скольжения

При этом способе регулирования обеспечивается плавное изменение частоты вращения и улучшаются пусковые свойства двигателя.

2. Устройство, схема включения и принцип действия однофазного асинхронного электродвигателя. Механическая характеристика.

Однофазные асинхронные двигатели малой мощности (от единиц до сотен ватт) используют в установках для привода рабочих машин, электробытовых приборах, устройствах автоматики. В рамках единой серии асинхронных двигателей 4А выпускают однофазные асинхронные двигатели: с пусковой емкостью (4ААУ); с пусковым сопротивлением (4ААЕ); с рабочей емкостью (4ААТ); с пусковой и рабочей емкостями (4ААУТ).

Однофазный двигатель (рис. 3.5, а) имеет на статоре рабочую обмотку Р, подключаемую к однофазной сети переменного тока, и вспомогательную (пусковую) обмотку П. Последняя подключается к питающей сети только на время пуска двигателя. Обмотку ротора выполняют обычно короткозамкнутой в виде беличьей клетки.

При протекании по рабочей обмотке однофазного тока МДС обмотки создает пульсирующее магнитное поле с потоком  $\Phi_{max}$ . Пульсирующее магнитное поле можно разложить на два одинаковых по амплитуде и синхронно вращающихся в противоположных направлениях магнитных поля, условно называемых прямым и обратным полями. Направление вращения прямого поля, характеризующегося магнитным потоком  $\Phi_{пр} = 0,5\Phi_{max}$ , совпадает с направлением вращения ротора, а обратное поле с  $\Phi_{обр} = 0,5\Phi_{max}$  имеет противоположное направление. Частота вращения полей  $n_{пр} = n_{обр} = 60f_1/p = n_1$

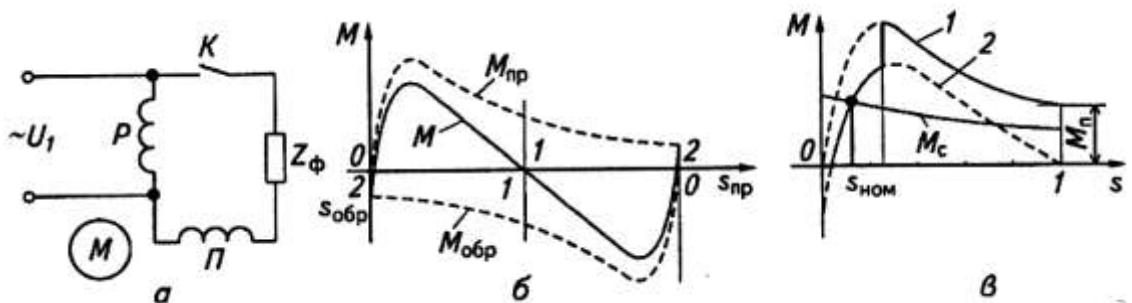


Рис. 3.5 Схема однофазного асинхронного двигателя (а), его механическая характеристика (б) и вид характеристики при пуске (в)

В момент пуска двигателя врачающиеся поля пересекают неподвижный ротор, индуцируя в его обмотке ЭДС  $E_{2np}$  и  $E_{2обр}$ , под действием которых в обмотке протекают токи  $I_{2np}$  и  $I_{2обр}$ . Токи в проводниках ротора, взаимодействуя каждый со своим магнитным потоком, создают электромагнитные врачающие моменты, т. е.

$$\vec{I}_{i\delta} = \tilde{N}_i \hat{O}_{i\delta} I_{2i\delta} \cos \psi_{2i\delta}$$

$$\vec{I}_{i\alpha\delta} = \tilde{N}_i \hat{O}_{i\alpha\delta} I_{2i\alpha\delta} \cos \psi_{2i\alpha\delta}$$

Вследствие равенства моментов и их противоположного направления результирующий момент двигателя

$$M = M_{np} - M_{обр} = 0 \quad (3.3)$$

Механическая характеристика однофазного двигателя приведена на рисунке 3.5, б, из которого следует, что при скольжении  $s = 1$  момент двигателя  $M = 0$ .

Таким образом, однофазный асинхронный двигатель не имеет пускового момента и может быть пущен в ход лишь при создании начального пускового момента. В этом случае действие пульсирующего магнитного поля на вращающийся ротор проявляется следующим образом.

Скольжение ротора относительно прямого поля

$$s_{i\delta} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

откуда

$$n_2 = n_1 (1 - s_{np}) \quad (3.4)$$

Относительно обратного поля

$$s_{obp} = \frac{n_1 - s_{np}}{n_1} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = \frac{n_1 + n_1(1-s_{np})}{n_1} = 2 - s_{np} \quad (3.5)$$

Токи, индуцируемые в обмотках ротора прямым и обратным полями определяют как

$$I_{2np} = \frac{E_{2np}}{R_2/s_{np} + jX_2} \quad (3.6)$$

$$I_{2obp} = \frac{E_{2obp}}{R_2/(1-s_{np}) + jX_2} \quad (3.7)$$

При этом частота тока в роторе

$$\begin{aligned} f_{2np} &= f_1 s_{np} \\ f_{2obp} &= f_1 (1-s_{np}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Поскольку при номинальном рабочем режиме двигателя скольжение  $s_{np} = 0,03...0,07$ , частоты токов  $f_{2np} = 1,5...3,5$  Гц и  $f_{2obp} = 98,5...96,5$  Гц, то ток  $I_{2np}$  по характеру будет практически активным ( $R_2/s_{np} \gg X_2$ ), а ток  $I_{2obp}$  — реактивным [ $R_2/(2-s_{np}) \ll X_2$ ]. Кроме того, из-за индуктивного характера тока  $I_{2obp}$ , оказывающего размагничивающее действие на обратное поле, поток  $\Phi_{obp}$  сильно ослабляется. Следовательно, при вращающемся роторе магнитный поток  $\Phi_{np}$  прямого поля, активная составляющая тока  $I_{2np}$  и обусловленный ими вращающий момент  $M_{np}$  будут существенно больше указанных величин, обусловленных обратным полем. Поэтому результирующий момент двигатель будет работоспособным.

$$M = M_{np} - M_{obp} \succ 0$$

Для создания начального пускового момента двигатель снабжен пусковой обмоткой. Конструктивно рабочая обмотка двигателя занимает 2/3 полюсного деления, а пусковая — оставшуюся часть. Оси обмоток смешены в пространстве на 90 электрических градусов. Для получения вращающегося магнитного поля токи в обмотках должны иметь временной сдвиг. Поэтому последовательно с пусковой обмоткой включают фазосдвигающий элемент  $Z_\phi$ , обеспечивающий фазовый сдвиг между токами в обмотках. Пусковые условия будут лучше при использовании в качестве фазосдвигающего элемента конденсатора. При этом фазовый сдвиг между токами может быть равным  $90^\circ$  и при равенстве МДС обмоток получается круговое вращающееся поле. Однако конденсаторный пуск применяют крайне редко из-за значительной величины требуемой емкости конденсатора и удорожания установки. Чаще в качестве фазосдвигающего элемента служит активное сопротивление. Реально пусковую обмотку выполняют с повышенным активным сопротивлением, и она одновременно выполняет роль фазосдвигающего элемента.

Вид характеристики при пуске показан на рисунке 3.5, в. При включении пусковой обмотки путем замыкания контакта К образуется эллиптическое вращающееся магнитное поле, увлекающее за собой ротор. Вращающий момент двигателя изменяется в соответствии с характеристикой 1. При достижении частоты вращения  $\pi_2 \approx 0,75\pi_1$  пусковую обмотку отключают, и в дальнейшем двигатель работает на характеристике 2. Пусковая обмотка отключается автоматически с помощью центробежного выключателя, контактами релейных устройств или вручную.

3. Работа трёхфазного асинхронного двигателя от однофазной сети

Трехфазный двигатель можно использовать для работы в однофазном режиме, питая его от однофазной сети переменного тока.

Схемы, показанные на рисунке 3.6, а, б, применяют в случаях, если обмотка статора двигателя имеет соответственно шесть и три выводных конца. В последнем случае обмотка статора может иметь схему соединения треугольником или звездой.

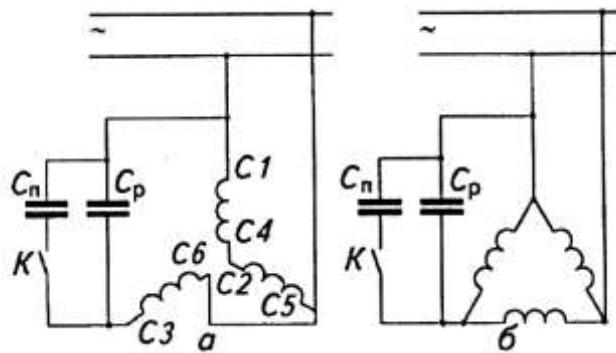


Рис. 3.6 Схемы подключения трёхфазного двигателя к однофазной сети: а и б – возможные варианты

Емкость рабочего конденсатора  $C_p$  приближенно определяют по следующим выражениям:

для схемы на рисунке 3.6, а

$$C_p \approx 2740I_{\text{ном}}/U_c \quad (3.9)$$

для схемы на рисунке 4.6, б при соединении обмоток статора треугольником

$$C_p \approx 4800I_{\text{ном}}/U_c \quad (3.10)$$

то же, при соединении обмоток статора звездой

$$C_p \approx 2800I_{\text{ном}}/U_c \quad (3.11)$$

где  $I_{\text{ном}}$  — номинальный фазный ток в обмотке статора;  $U_c$  — напряжение сети.

Для улучшения пусковых свойств двигателя параллельно рабочему конденсатору во время пуска включают дополнительный конденсатор с емкостью  $C_n = (2...3)C_p$ . Иногда значение  $C_n$  приходится увеличивать до значения  $C_n \leq 8C_p$ .

В схемах обычно применяют конденсаторы: бумажные (типов КБГ-МН, БГТ); металлобумажные (МБГЧ); электролитические пусковые (ЭП), предназначенные для работы в цепях переменного тока. При выборе конденсаторов необходимо учитывать, что напряжение на конденсаторах в схеме на рисунке 3.6, а  $U_k \approx 1,3U_c$ , а в схеме на рисунке 3.6, б  $U_k \approx 1,15 U_c$ . Если рабочее напряжение конденсатора указано для цепей постоянного тока, то при их использовании в цепях переменного тока частотой 50 Гц рабочее напряжение следует уменьшить примерно в 2 раза.

При использовании трехфазного двигателя в однофазном режиме его можно загрузить до мощности  $P_2 = (0,5...0,65)P_{\text{ном}}$ , а при использовании трехфазных двигателей в качестве конденсаторного однофазного двигателя с рабочей емкостью полезная мощность увеличивается до значения  $P_2 \approx P_{\text{ном}}$ .

#### 4. Тормозные режимы

Режим электромагнитного торможения. Если при вращающемся роторе изменяется направление вращения поля асинхронной машины, то оно оказывает на ротор тормозящее действие. Такой режим работы машины называют режимом электромагнитного торможения. При этом частота вращения ротора  $\pi_2 < 0$  (частоту вращения  $\pi_1$  принимают положительной), а следовательно, скольжение  $s > 1$ . В режиме электромагнитного торможения активная составляющая тока  $I_2$  совпадает по фазе с напряжением  $U_1$ . Следовательно, машина потребляет из сети электрическую мощность.

Чтобы перевести двигатель в режим электромагнитного торможения, следует изменить направление вращения магнитного поля (переключив два любых провода, присоединяющие фазы обмотки статора к сети трехфазного тока) и ввести в цепь ротора добавочное активное сопротивление. Увеличение сопротивления цепи ротора необходимо для ограничения силы тока машины, который при замкнутом накоротко роторе достигает большого значения. Кроме того, если машина работает на естественной характеристике, то режим, соответствующий  $s > 1$ , является неустойчивым (рис. 5.1); включение в цепь ротора добавочного активного сопротивления позволяет сдвинуть максимум момента в область скольжения  $s > 1$  (обеспечив тем самым устойчивое электромагнитное торможение) и регулировать тормозной момент.

На рис. 3.7 приведены механические характеристики асинхронной машины в режиме электромагнитного торможения при различных значениях добавочного сопротивления  $R_{\text{доб}}$  в цепи ротора. Чем больше сопротивление  $R_{\text{доб}}$ , тем мягче механическая характеристика и тем дальше в область кительных значений сдвигается максимум момента.



Рис. 3.7. Механическая характеристика асинхронной машины в режимах генераторном, электромагнитного торможения, двигательном

Практически режим электромагнитного торможения используют для быстрого останова механизмов. Его называют также торможением противовключением. Достоинство режима — возможность создавать большие тормозные моменты при низких частотах вращения и даже при частоте вращения, равной нулю, хотя с энергетической точки зрения этот режим не выгоден, так как асинхронная машина в процессе торможения потребляет из сети электрическую энергию. Эта энергия теряется в активных сопротивлениях двигателя и подключаемого в цепь обмотки ротора реостата.

При уменьшении частоты вращения ротора до нуля необходимо отключить двигатель от сети, иначе ротор начнет вращаться в противоположном направлении.

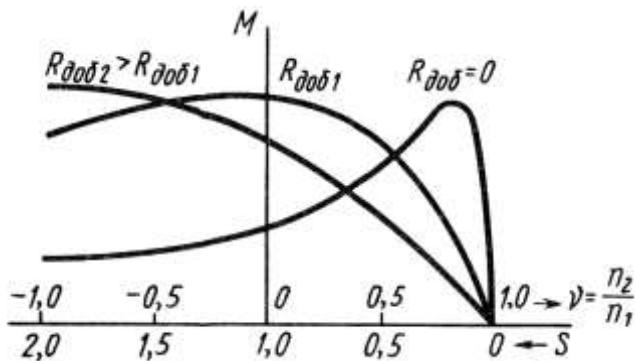


Рис. 3.8 Механическая характеристика асинхронной машины при работе в режиме электромагнитного торможения

**Режим динамического торможения.** В рассматривав режиме статор асинхронной машины отключают от сети переменного тока, а затем две его фазы подключают к источнику постоянного тока. При этом в машине появляется постоянный магнитный поток возбуждения, индуцирующий в обмотках ротора переменную ЭДС. Чтобы создать тормозной момент, к обмоткам ротора подключают активное сопротивление, в котором гасится энергия, возникающая в машине в результате торможения приводного механизма. В режиме динамическом торможения асинхронная машина превращается в автономный и синхронный генератор, работающий на реостат.

#### 1.4. Лекция № 4.(2 часа)

**Тема:** «Синхронный электродвигатель»

##### 1.4.1. Вопросы лекции

1. Устройство, схема включения и принцип действия синхронного электродвигателя
2. Механическая и угловая характеристики синхронного электродвигателя
3. Пуск синхронного электродвигателя
4. Режимы работы. Способы снижения пускового тока. Преимущества и недостатки синхронного электродвигателя по сравнению с асинхронными

##### 1.4.2. Краткое содержание вопросов

1. Устройство, схема включения и принцип действия синхронного электродвигателя

Синхронные машины – врачающиеся бесколлекторные машины переменного тока.

Синхронные машины, как и другие электрические машины, могут работать как в генераторном, так и двигателевом режиме. Синхронные двигатели применяются в тех случаях, когда нужен двигатель, работающий с постоянной частотой вращения.

К основным частям синхронного электродвигателя относят неподвижный статор и вращающийся ротор.

В синхронных электродвигателях нормального исполнения на статоре размещена обмотка якоря, т.е. обмотка, где индуцируется ЭДС. Конструктивно сердечник статора представляет собой полый цилиндр, набранный из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. На внутренней поверхности этого цилиндра выштампывают пазы для укладки обмотки якоря. При внешнем диаметре сердечника менее 1 м его собирают из цельных кольцевых пластин, а при большем диаметре каждый кольцевой слой составляют из отдельных пластин, называемых сегментами (рис. 4.1.). Сердечник размещают в станине (корпусе) статора.

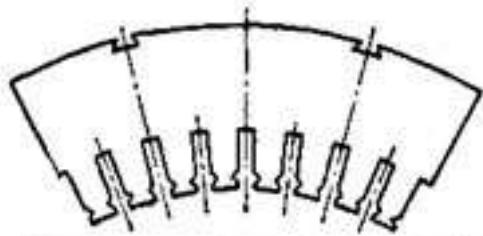


Рис. 4.1. Сегмент статора мощной синхронной машины

Пазы, как правило, имеют прямоугольное сечение. В эти пазы укладывают двухслойные петлевые обмотки, а в более мощных машинах - одновитковые стержневые волновые обмотки. Толщина и структура изоляции пазов и проводников зависит от индуцируемой ЭДС. При большом сечении проводников обмоток фаз для уменьшения добавочных потерь от вихревых токов их разбивают на ряд элементарных проводников, которые по длине обмотки транспонируют между собой.

По выполнению ротора машины подразделяются на явнополюсные и неявнополюсные.

Явнополюсный ротор синхронных машин имеет выступающие полюсы, сердечник которых в мощных машинах набирают из пластин конструкционной стали толщиной 1-2 мм, а в машинах небольшой мощности - из электротехнической стали толщиной 0,5-1 мм. На рис. 4.2. показаны различные способы крепления полюсов.

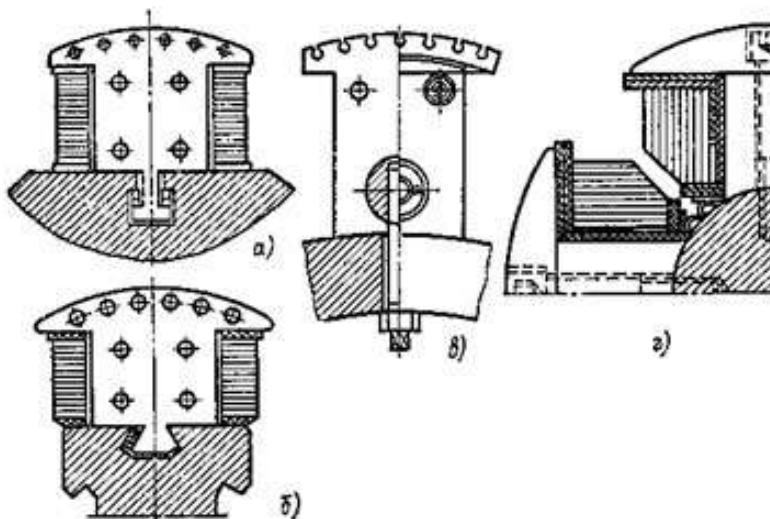


Рис. 4.2. Крепление полюсов к ободу ротора с помощью хвоста Т-образной формы (а), ласточкиного хвоста (б), болтов (в,г)

В машинах небольшой мощности полюсы крепят болтами к валу (рис. 4.2, г), а в тихоходных машинах большой мощности - к ободу ротора (рис. 4.2, в). В мощных и относительно быстроходных машинах полюсы крепят к ободу ротора с помощью хвостов, имеющих Т-образную форму или форму ласточкина хвоста (рис. 4.2, а и б). Такое крепление хотя технологически сложнее, но является более прочным, чем крепление болтами.

Обмотку возбуждения в мощных машинах для лучшего охлаждения выполняют из неизолированных медных шин большого сечения, намотанных на ребро. В машинах небольшой мощности катушки обмотки возбуждения выполняют из изолированных проводников прямоугольного или круглого сечения.

На полюсах ротора часто укладывают демпферную обмотку. Ее размещают в пазах полюсных наконечников. Медные стержни этой обмотки, уложенные в пазы, по торцам замыкают пластинами или кольцами так, что образуется клетка. Демпферная обмотка выполняет ряд функций. В генераторах она ослабляет влияние несимметричной нагрузки

и снижает амплитуду колебаний ротора, возникающих в некоторых случаях при параллельной работе. В двигателях она является пусковой обмоткой, а также снижает амплитуду колебаний ротора при пульсации нагрузки.

Явнополюсные роторы применяют в машинах большой мощности с относительно низкой частотой вращения, т.е. имеющих большое число полюсов. Синхронные машины с явнополюсным ротором и горизонтальным валом широко используют в качестве двигателей и генераторов. Общий вид ротора явнополюсной машины показан на рис. 4.3.

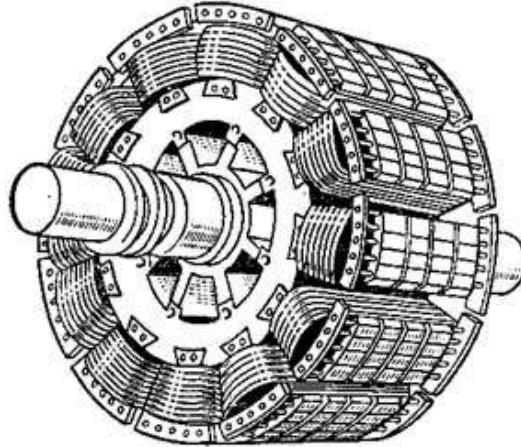


Рис. 4.3. Ротор явнополюсной синхронной машины

Принцип действия синхронных электродвигателей основан на явлении электромагнитной индукции и взаимодействии магнитного поля с электрическим током.

Если к выводам обмотки статора (рис 4.4) подключить нагрузку, то проходящий по фазным обмоткам трехфазный ток создаст вращающееся магнитное поле, частота вращения которого зависит от частоты тока и числа пар полюсов обмотки (последнее такое же, как и на роторе), т.е.

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (4.1)$$

где  $f_1$  - частота тока,  
 $p$  - число пар полюсов

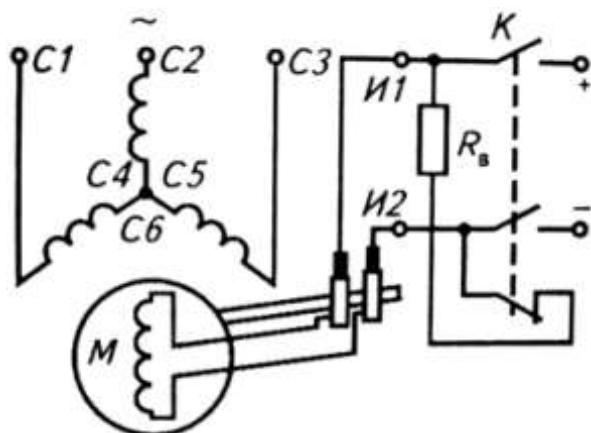


Рис. 4.4. Схема включения синхронного электродвигателя

При работе синхронной машины двигателем трехфазная обмотка якоря присоединяется к трехфазной сети. При этом образуется вращающееся магнитное поле с частотой вращения  $n_1$ . Это поле, взаимодействуя с полем полюсов ротора, создает вращающий момент. Чтобы этот момент имел одно и то же направление, поля должны быть неподвижны относительно друг друга. Это имеет место, если ротор и,

следовательно, его магнитное поле вращаются с частотой, равной  $n_1$ . Поэтому в синхронном двигателе ротор как при холостом ходе, так и при нагрузке вращается с постоянной частотой, равной частоте вращения поля  $n_1$ . Этую частоту вращения называют синхронной (совпадающей). Вот почему такие электродвигатели называются синхронными. По другому определению синхронные электродвигатели – электрические двигатели переменного тока, у которых в установившемся режиме работы частота вращения ротора кратна частоте тока в цепи, подключенной к обмотке якоря. При этом такое отношение имеет постоянное значение и не зависит от тока нагрузки.

Синхронные двигатели выпускают в большом диапазоне мощностей (до 50 мВт) и частоты вращения ( $100\ldots3000$  мин $^{-1}$ ) и применяют для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения: вентиляторов, воздуховодов, насосов, турбокомпрессоров, шаровых мельниц и т.п.

## 2. Механическая и угловая характеристики синхронного электродвигателя

Рабочими характеристиками синхронного двигателя являются зависимости потребляемой мощности  $P_1$ , потребляемого тока  $I_1$ , врачающего момента  $M$ ,  $\cos \varphi$  и к.п.д.  $\eta$  от полезной мощности нагрузки  $P_2$ . Они изображены на рис. 4.5. и соответствуют случаю, когда на холостом ходу  $\cos \varphi = 1$

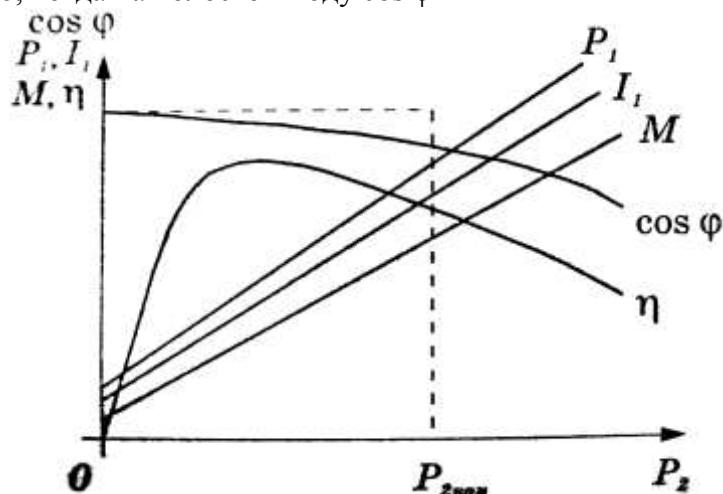


Рис. 4.5 Рабочие характеристики синхронного двигателя

При постоянном токе возбуждения увеличение нагрузки на валу двигателя вызывает уменьшение  $\cos \varphi$ , что объясняется увеличением реактивного падения напряжения при возрастании потребляемого от сети тока  $I_1$ . Коэффициент полезного действия  $\eta$  с увеличением нагрузки быстро увеличивается и достигает максимума, когда не зависящие от нагрузки механические потери и потери в стали становятся равными зависящими от нагрузки потерями в меди обмоток.

Дальнейшее увеличение нагрузки снижает к.п.д. Потребляемый статором ток  $I_1$  на холостом ходу мал и при  $\cos \varphi = 1$ . При увеличении нагрузки ток  $I_1$  возрастает практически пропорционально нагрузке. Вращающий момент  $M$ , развиваемый двигателем, на холостом ходу мал, поскольку механические потери невелики. При увеличении нагрузки, благодаря постоянству скорости вращения синхронного двигателя, вращающий момент возрастает почти линейно. Потребляемая двигателем мощность  $P_1$  растет быстрее, чем полезная  $P_2$ , так при увеличении нагрузки сказывается увеличение электрических потерь в двигателе, которые пропорциональны квадрату тока.

Механическая характеристика  $\omega = f(M)$  не раскрывает приводные свойства синхронного двигателя. Поэтому для оценки приводных свойств синхронного двигателя используют его угловую характеристику  $M = f(\theta)$ , связывающую вращающий момент  $M$  двигателя с углом нагрузки (рассогласования)  $\theta$ , который для каждой фазы равен углу

между векторами фазного напряжения  $U_1$  и ЭДС  $E_0$  от основного магнитного потока этой фазы:

$$M = \frac{mU_1E_0}{\omega_0 x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2\omega_0} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (4.2)$$

где  $m$  – число фаз;

$x_d, x_q$  – индуктивные сопротивления синхронного двигателя по продольной и поперечной осям, Ом.

Первое слагаемое в формуле (4.2) – синхронный вращающий момент синхронного двигателя, второе – реактивный. Изменение вращающих моментов синхронного двигателя – суммарного, синхронного и реактивного – от значения угла нагрузки  $\theta$  соответственно представлено кривыми 1, 2, 3 (рис. 4.6, б).

При номинальной нагрузке  $M=M_h$  угол нагрузки синхронного двигателя  $\theta_h = 20^\circ \dots 30^\circ$  эл. град. Поэтому перегрузочная способность синхронного двигателя в среднем равна  $\sin(90^\circ)/\sin(20^\circ \dots 30^\circ)$  и составляет  $M_k/M_h = 2 \dots 3$ .

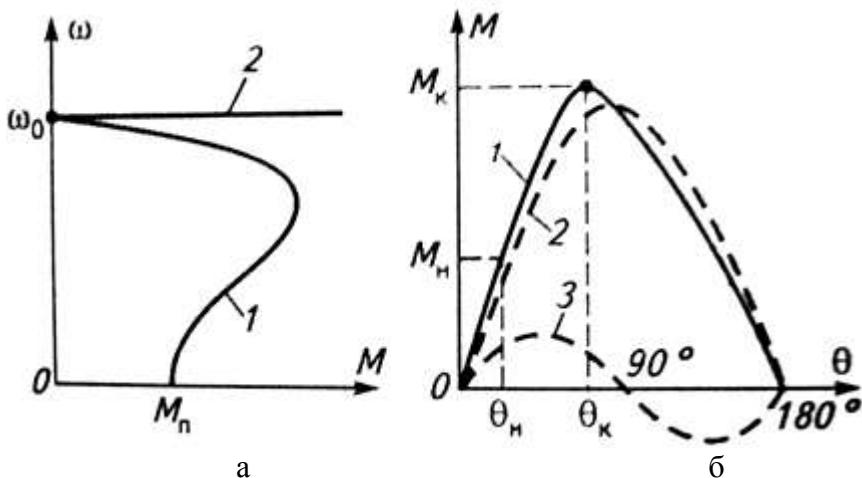


Рис. 4.6 Механические характеристики (а) при пуске (1) и работе (2) и угловые характеристики (б) синхронного двигателя явнополюсного (1), неявнополюсного (2) и явнополюсного без обмотки возбуждения (3)

### 3. Пуск синхронного электродвигателя

Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента. При подключении двигателя к сети на статоре образуется вращающееся магнитное поле с частотой вращения  $n_c = \frac{60f_1}{p}$ . Взаимодействие этого поля с магнитным полем возбуждения ротора определяет электромагнитный момент, например  $M = \frac{U_c E_0}{X_c} \sin \theta > 0$ , под действием

которого ротор должен был начать вращаться. Однако за полпериода изменения тока статора, т.е. за время  $t = 0,01$  с, вращающееся магнитное поле переместится на полюсное деление или на угол  $(\theta + \pi)$ , а ротор из-за инерции не может за это время разогнаться до синхронной частоты вращения и переместиться на этот угол. Поэтому электромагнитный момент двигателя изменит знак:  $M = \frac{U_c E_0}{X_c} \sin \theta + \pi < 0$ . За период момента дважды

изменяет свое направление и в среднем равен нулю. В результате ротор остается неподвижным.

Процесс пуска синхронного двигателя разбивается на два этапа: сначала его разгоняют до подсинхронной скорости, равной примерно  $0,95\omega_c$ , используя асинхронный метод пуска, а затем подают в обмотку возбуждения ротора ток, после чего двигатель самостоятельно втягивается в синхронизм.

Для асинхронного пуска двигатели явнополюсного типа имеют на полюсных наконечниках короткозамкнутую пусковую обмотку. В двигателях неявнополюсного типа роль пусковой обмотки выполняет массивный сердечник ротора. Вращающееся магнитное поле статора индуцирует в пусковой обмотке ротора токи, в результате чего создается вращающий электромагнитный момент и ротор, ускоряясь, достигает угловой скорости, близкой к синхронной. После подачи тока в обмотку возбуждения в двигателе кроме асинхронного момента появляется и синхронный момент, образующийся от взаимодействия вращающегося магнитного поля статора и магнитного поля возбуждения ротора. В результате их совместного действия ротор втягивается в синхронизм, вращаясь с синхронной угловой скоростью  $\omega_c$ .

При асинхронном пуске обмотку возбуждения LM, как правило, отсоединяют от возбудителя GE. При этом ее нельзя оставлять разомкнутой, так как в момент пуска магнитное поле статора индуцирует в ней значительную ЭДС, что может вызвать пробой изоляции обмотки. Одна из применяемых схем пуска синхронных двигателей приведена на рисунке 5.7.

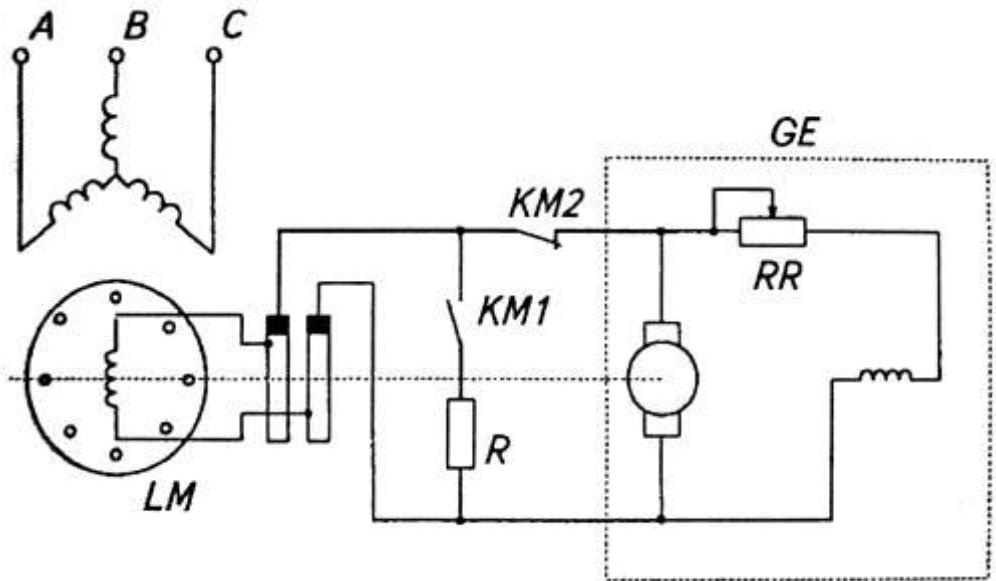


Рис 4.7. Принципиальная электрическая схема синхронного двигателя с устройством для пуска

При отключении двигателя от сети, а также во время разбега ротора при пуске обмотки возбуждения двигателя отсоединяется от возбудителя и подключается к гасительному резистору с сопротивлением  $R = (8 \dots 12) R_b$ , где  $R_b$  – сопротивление обмотки возбуждения. В синхронных машинах эта операция в этих режимах осуществляется устройством автоматического гашения поля, контакты которого KM1 замкнуты, а KM2 разомкнуты. При достижении ротором угловой скорости  $\omega \approx 0,95\omega_c$  устройство переключает контакты, присоединяя обмотку возбуждения двигателя к возбудителю.

4. Режимы работы. Способы снижения пускового тока. Преимущества и недостатки синхронного электродвигателя по сравнению с асинхронными

Синхронные двигатели имеют следующие преимущества перед асинхронными:

- меньшую чувствительность к отклонениям напряжения питающей сети, так как их момент пропорционален напряжению, а не квадрату напряжения как для асинхронных двигателей;
- постоянную частоту вращения, не зависящую от нагрузки на валу;
- способность вырабатывать реактивную мощность и снабжать ею асинхронные двигатели, работающие параллельно с ними;

- достоинством синхронного электродвигателя является возможность получения оптимального режима по реактивной энергии, который осуществляется путем автоматического регулирования тока возбуждения двигателя. Синхронный двигатель может работать, не потребляя и не отдавая реактивной энергии в сеть, при  $\cos \phi = 1$ . Если для предприятия необходима выработка реактивной энергии, то синхронный электродвигатель, работая с перевозбуждением, может отдавать ее в сеть.

- синхронные электродвигатели имеют высокую перегрузочную способность. Кроме того, перегрузочная способность синхронного двигателя может быть автоматически увеличена за счет повышения тока возбуждения, например, при резком кратковременном повышении нагрузки на валу двигателя.

Недостатки синхронных двигателей: сложность конструкции и пуска в ход; регулирование частоты вращения возможно только путем изменения частоты питающего напряжения.

Синхронные двигатели предпочтительнее использовать по сравнению с асинхронными только при больших мощностях (более 100 кВт).

## **1.5 Лекция № 5.(2 часа)**

**Тема:** «Двигатели специального назначения»

### **1.5.1. Вопросы лекции**

1. Погружные электродвигатели
2. Коллекторные универсальные электродвигатели
3. Двигатели с постоянными магнитами
4. Шаговые электродвигатели
5. Дугостаторные и торцевые электродвигатели

### **1.5.2 Краткое содержание вопросов**

1. Погружные электродвигатели

Погружные электродвигатели представляют собой асинхронные машины с водяным охлаждением статорной обмотки, предназначены для привода погружных насосов (рис. 5.1).

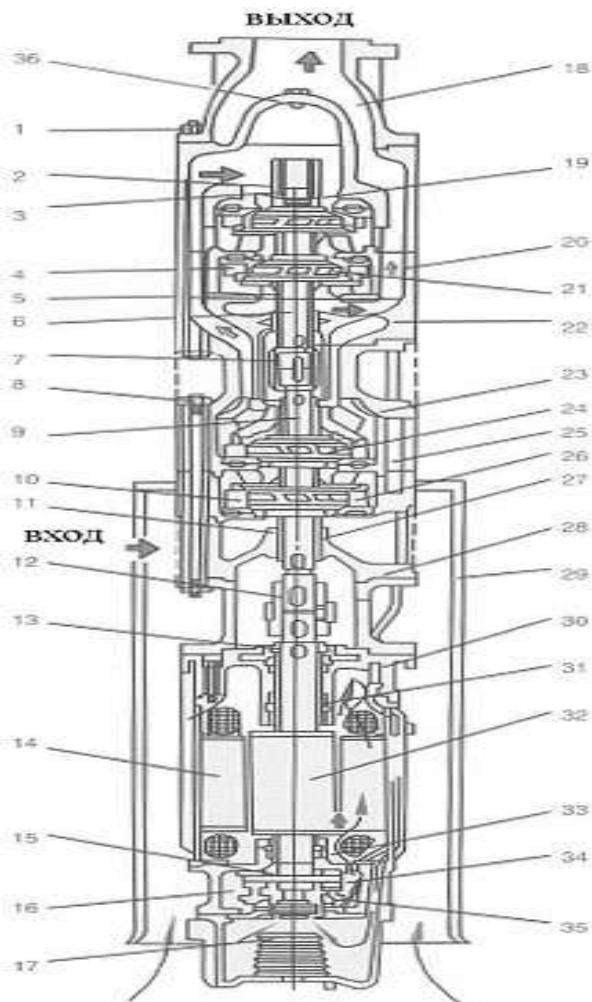


Рис. 5.1. Конструкционная схема погружного насоса

1 – стяжной болт; 2 – подшипник; 3, 11 – втулки вала с хромовым покрытием; 4 – верхний диффузор; 5 – регулирующее кольцо; 6 – верхний вал насоса; 7 – соединительная муфта; 8 – гайка; 9 – нижний вал насоса; 10 – нижний диффузор; 12 – соединительная муфта насоса с двигателем; 13 – дефлектор; 14 – статор; 15 – сегмент верхнего упорного подшипника; 16 – основание нижнего упорного подшипника двигателя; 17 – компенсатор теплового расширения; 18 – секция подачи; 19 – верхняя секция подачи; 20 – верхняя межкаскадная секция; 21 – верхний импеллер; 22 – секция подачи с одним блоком всасывания; 23 – промежуточная секция; 24 – балансирующий импеллер; 25 – нижняя межкаскадная секция; 26 – нижний импеллер; 27 – подшипник; 28 – нижняя секция всасывания; 29 – обод; 30 – основание верхнего подшипника двигателя; 31 – верхний подшипник двигателя; 32 – ротор; 33 – нижний подшипник двигателя; 34 – упорный диск; 35 – нижний сегмент упорного подшипника; 36 – воздушный выпускной клапан.

Электродвигатель трехфазный асинхронный, с короткозамкнутым ротором, водозаполненный, погружной типа ПЭДВ состоит из статора, ротора, верхнего и нижнего подшипниковых щитов, упорного подшипника, днища и диафрагмы. Статор представляет собой стальную трубу с запрессованным в ней пакетом, который крепится в корпусе нажимными шайбами и упорными кольцами. Электродвигатели ПЭДВ имеют литую изоляцию обмотки.

Обмотка статора соединена в звезду и имеет три вывода, к которым присоединяется токопроводящий кабель. Ротор – стальной вал с напрессованным на него пакетом и подшипниками втулками, изготовленными из нержавеющей стали. Пакеты статора и ротора набраны из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Ротор вращается в радиальных резинометаллических подшипниках, запрессованных в литые чугунные подшипниковые щиты. Подшипники смачиваются водой, залитой во внутреннюю полость электродвигателя. Для восприятия осевой нагрузки, возникающей при работе электронасосного агрегата, служит упорный подшипник, который состоит из пяты и под пятника. Пята установлена на роторе, под пятник – в корпусе на сферической втулке. В корпусе под пятника размещено отверстие для слива воды из электродвигателя. Для залива воды на верхнем щите или в подводе также предусмотрено отверстие. В рабочем состоянии отверстие герметично закрыто пробками. Между корпусом под пятника и днищем установлена резиновая диафрагма, служащая для компенсации тепловых расширений воды и для уравнивания давления между внутренней полостью электродвигателя и внешней средой. Подшипниковый щит, корпус под пятника и днище крепятся к статору шпильками. Внутренняя полость электродвигателя изолируется от попадания в нее воды, откачиваемой насосом. Герметизация посадочных поверхностей подшипниковых щитов, корпуса под пятника, а также отверстия под шпильки и выводы осуществляется резиновыми уплотнительными кольцами. Перед монтажом электронасосного агрегата внутреннюю полость электродвигателя заливают чистой профильтрованной питьевой водой с температурой не выше 25 °С. Питание электродвигателей осуществляется от сети трехфазного тока частотой 50 Гц и напряжением 380 В (кроме электронасосов с однофазными двигателями напряжением 220 В ПЭДВ-0,5-93 и ПЭДВ-0,7-93).

## 2. Коллекторные универсальные электродвигатели

Универсальными коллекторными двигателями называют двигатели которые могут работать как от сети постоянного тока, так и от однофазной сети переменного тока. Двигатели применяют в качестве приводных для электроинструментов, бытовых электроприборов, в устройствах автоматики и т.п. Выпускают двигатели серий УЛ, УЛМ, МУН мощностью 10...600 Вт с частотой вращения до 8000 мин<sup>-1</sup>, а для некоторых специальных изделий - до 30000 мин<sup>-1</sup>.

Конструктивно универсальный коллекторный двигатель не имеет принципиальных отличий от двигателя постоянного тока, за исключением того, что его ротор и статор выполняют шихтованными, а обмотка возбуждения имеет отпайки. Последнее вызвано необходимостью изменения числа витков обмотки для сближения рабочих характеристик двигателя при работе от сети постоянного и переменного тока.

Универсальный коллекторный двигатель, по существу, — двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением.

Обмотка возбуждения LM двигателя M (рис. 5.2) разделена на две части, которые включены с разных сторон якоря. Благодаря этому уменьшаются радиопомехи, создаваемые двигателем при работе. С той же целью между выводами двигателя и корпусом могут быть включены конденсаторы.

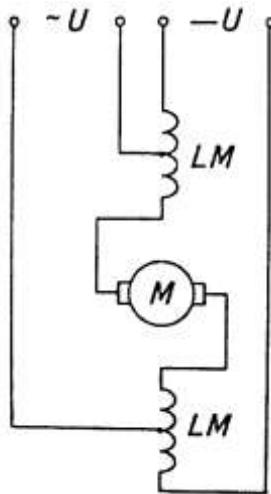


Рис. 5.2. Схема универсального коллекторного двигателя

Работа универсального коллекторного двигателя на постоянном токе ничем не отличается от работы двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением. Поэтому далее рассмотрим особенности работы двигателя при питании от сети переменного тока. В этом случае ток двигателя и магнитный поток изменяются по синусоидальному закону:

$$i = I_m \sin \omega t; \\ \Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \alpha), \quad (5.1)$$

где  $\alpha$  – угол магнитного запаздывания потока от вызвавшего его тока ( $\alpha = 5\ldots 7^\circ$ ).

Мгновенное значение врачающего момента

$$M = Ci\Phi \quad (5.2)$$

После подстановки выражений (6.1) в формулу (6.2) с учётом тригонометрической формулы приведения функций получим выражение для момента

$$M = CI\Phi \cos \alpha - CI\Phi \cos(\omega t - \alpha) \quad (5.3)$$

Кривые изменения тока  $i$ , потока  $\Phi$  и момента  $M$  во времени приведены на рисунке 6.3, из которого видно, что мгновенное значение момента пульсирует с двойной частотой относительно постоянного по значению среднего момента:

$$M_{op} = CI\Phi \quad (5.4)$$

который практически равен моменту двигателя при работе от сети постоянного тока. Изменение полярности переменного тока происходит почти одновременно с изменением полярности магнитного потока, и, следовательно, момент имеет один и тот же знак ( $M > 0$ ). Поэтому двигатель может работать от сети переменного тока.

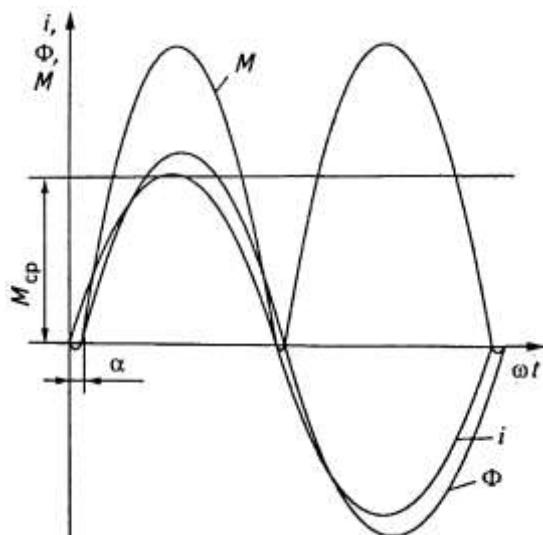


Рис. 5.3. Кривые тока магнитного потока и момента при питании универсального коллекторного двигателя от сети переменного тока

Угловая скорость двигателя при питании постоянным током

$$\omega = \frac{U - I(R_a + R_b)}{C\Phi} \quad (5.5)$$

а при питании переменным током

$$\omega = \frac{U - IZ}{C\Phi} \quad (5.6)$$

где  $Z = R_a + R_b + j(X_{ba} + X_{bv})$  (здесь  $R_a$  и  $R_b$  - активные сопротивления соответственно обмотки якоря и обмотки возбуждения;  $X_{ba}$  и  $X_{bv}$  - индуктивные сопротивления рассеяния обмоток).

Из выражения (6.5) и (6.6) следует, что при одинаковом значении напряжения угловые скорости двигателя будут разными из-за неравенства  $Z > (R_a + R_b)$ . Поэтому для обеспечения одинаковых скоростей необходимо у двигателя, работающего от сети переменного тока, несколько уменьшить магнитный поток  $\Phi$ , сократив число витков обмотки возбуждения. Для этого обмотка возбуждения двигателя имеет соответствующие выводы (отпайки).

Частота вращения двигателя не зависит от частоты тока в сети, а определяется величиной приложенного напряжения. Принципиально двигатель может быть выполнен на любую частоту вращения, что недостижимо для асинхронных и синхронных двигателей.

Механические характеристики  $M=f(\omega)$  универсального коллекторного двигателя при питании от сети переменного тока более мягкие по сравнению с двигателями постоянного тока с последовательным возбуждением.

Коммутация в двигателях при работе от сети переменного тока намного хуже. Это объясняется тем, что плоскость коммутирующей секции обмотки якоря пронизывается пульсирующим магнитным потоком обмотки возбуждения и в ней индуцируется трансформаторная ЭДС  $E_{tp} = 4,44f w_k \Phi_t$ . Наличие в коммутирующей секции нескомпенсированной трансформаторной ЭДС приводит к постоянному искрению под щетками и сильным радиопомехам. Из-за использования твердых щеток двигатели создают большой шум.

При одинаковой мощности на валу двигатели на переменном токе потребляют больший ток из-за наличия реактивной составляющей тока. Увеличиваются также магнитные и электрические потери, а коэффициент полезного действия снижается.

### 3. Двигатели с постоянными магнитами

Двигатели с постоянными магнитами состоят из статора, который имеет обмотки, и ротора, содержащего постоянные магниты. Чередующиеся полюса ротора имеют прямолинейную форму и расположены параллельно оси двигателя. Благодаря намагниченности ротора в таких двигателях обеспечивается больший магнитный поток и, как следствие, больший момент, чем у двигателей с переменным магнитным сопротивлением.

Показанный на рисунке 6.4 двигатель имеет 3 пары полюсов ротора и 2 пары полюсов статора. Двигатель имеет 2 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель, как и рассмотренный ранее двигатель с переменным магнитным сопротивлением, имеет величину шага 30 град. При включении тока в одной из катушек, ротор стремится занять такое положение, когда разноименные полюса ротора и статора находятся друг напротив друга. Для осуществления непрерывного вращения нужно включать фазы попеременно. На практике двигатели с постоянными магнитами обычно имеют 48-24 шага на оборот (угол шага 7,5 - 15 град).

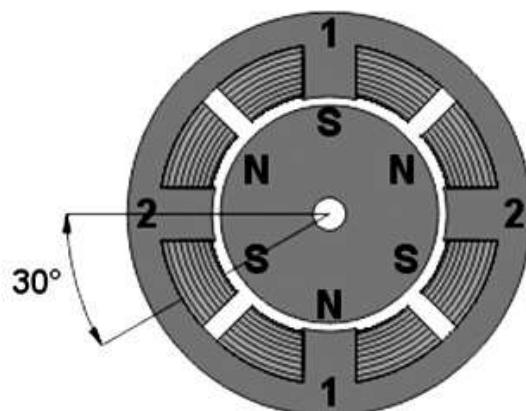


Рис. 5.4. Двигатель с постоянными магнитами

Разрез реального шагового двигателя с постоянными магнитами показан на рис. 5.5.

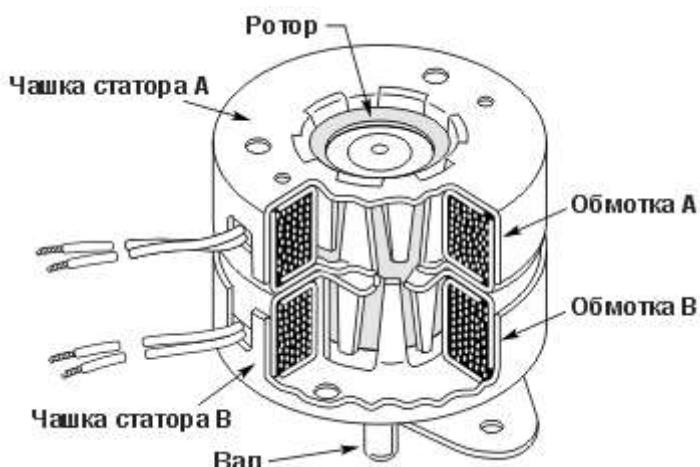


Рис. 5.5 Разрез шагового двигателя с постоянными магнитами

Для удешевления конструкции двигателя магнитопровод статора выполнен в виде штампованного стакана. Внутри находятся полюсные наконечники в виде ламелей. Обмотки фаз размещены на двух разных магнитопроводах, которые установлены друг на друге. Ротор представляет собой цилиндрический многополюсный постоянный магнит.

Двигатели с постоянными магнитами подвержены влиянию обратной ЭДС со стороны ротора, которая ограничивает максимальную скорость. Для работы на высоких скоростях используются двигатели с переменным магнитным сопротивлением.

#### 4. Шаговые электродвигатели

Шаговые, или импульсные, двигатели относят к синхронным микродвигателям, у которых питание фазных обмоток якоря осуществляется кратковременными импульсами постоянного напряжения. В результате этого ротор двигателя совершает дискретные (скачкообразные) перемещения на некоторый угол, называемый шагом. По существу, шаговые двигатели представляют собой исполнительные двигатели, преобразующие импульсные команды в угловое поступательное или непрерывное вращательное перемещение вала.

Шаговым двигателем управляют с помощью электронного коммутатора, который формирует сигнал управления и распределяет его поступление в фазные обмотки в соответствии с заданной программой.

Для реализации шагового двигателя используют известные конструкции синхронного двигателя. Обычно применяют синхронные двигатели без обмотки возбуждения на роторе: с постоянными магнитами и реактивные, в том числе и редукторные. Используют также шаговые двигатели, по конструкции и принципу действия сходные с индукторными двигателями с радиальным возбуждением.

На рисунке 6.6 показана конструктивная схема реактивного шагового двигателя с трехфазной обмоткой, размещенной на выступающих полюсах статора. Обмотка каждой фазы состоит из двух катушек на противоположных полюсных выступах, которые соединены так, что при протекании по обмотке постоянного тока образуется пара полюсов противоположной полярности. Под действием реактивного момента ротор устанавливается таким образом, чтобы магнитная проводимость для потока полюсов была максимальной.

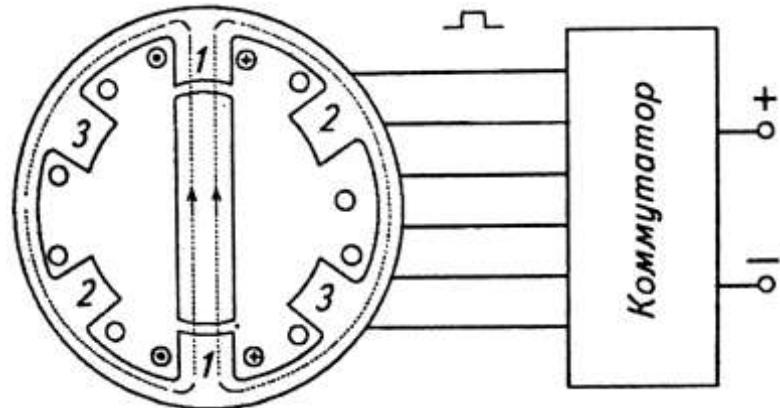


Рис. 5.6. Конструктивная схема реактивного шагового двигателя

Например, если подать импульсы постоянного напряжения на обмотку 1-1, то ротор установится по оси полюсов, образованных этой обмоткой. Если снять возбуждение с обмотки 1-1 и подать его на обмотку 2-2, то ротор скачком повернется на  $60^\circ$ . Если затем напряжение возбуждения подать только на обмотку 3-3 то ротор сделает еще шаг в  $60^\circ$ . Такую трехтактную схему коммутации обмоток (1-2-3-1...) называют раздельной. За один цикл коммутации ротор совершает поворот на  $180^\circ$ . Чаще реактивный трехфазный шаговый двигатель работает по шеститактной схеме коммутации. В этом случае питающий импульс подается сначала на первую обмотку (1), затем одновременно на первую и вторую обмотки (1, 2), после только на вторую (2), далее одновременно на вторую и третью обмотки (2, 3), только на третью (3) и затем одновременно на третью и первую обмотки (3, 1). Такую схему коммутации (1-1, 2-2-2, 3-3-3, 1-...) называют раздельно-совместной. При этом шаг двигателя (угол поворота ротора за один такт) уменьшается в 2 раза и будет равен  $\alpha_{ш} = 30^\circ$ . Следует отметить, что реактивные шаговые

двигатели работают от однополярных импульсов напряжения, так как изменение их полярности не изменяет направления реактивного момента. Направление вращения ротора изменяют путем изменения схемы коммутации обмоток.

Шаг двигателя:

$$\alpha_{us} = \frac{360^\circ}{2p_2 m_y K} \quad (5.7)$$

где  $2p_2$  – число полюсных выступов на роторе;

$m_y$  – число фазных обмоток управления;

$K$  – коэффициент (при раздельном включении обмоток  $K = 1$ ; при раздельно-совместном –  $K = 2$ ).

Существенного уменьшения шага достигают в реактивных редукторных шаговых двигателях, у которых используются гребенчатые выступы на статоре и зубчатый ротор с зубцовыми делениями до 2 мм. При этом шаг может быть меньше  $1^\circ$ . К основным параметрам шаговых двигателей относят цену (величину) шага в градусах, частоту приемистости, устойчивость, врачающий момент. Под частотой приемистости понимают максимальную частоту следования управляющих импульсов, при которой ротор втягивается в синхронизм с места без потери шага. У реактивных шаговых двигателей частота приемистости достигает 1400 шаг/с. Устойчивость характеризует способность ротора занимать устойчивое положение, соответствующее положению вектора результирующей МДС статора, при каждом шаге вектора МДС.

Шаговые двигатели применяют как для привода механизмов, имеющих старт-стопное движение: подача пленки и изменение масштаба изображения в камерах, факсимильные аппараты, принтерах, копировальные машины, лотки подачи и сортировщики бумаги, а также дисководы, автомобилестроение, светотехническое оборудование, теплотехника, станки с ЧПУ, роботы и т.п., так и для механизмов с непрерывным вращением, если их управляющий сигнал задан в виде импульсного кода.

## 5. Дугостаторные и торцевые электродвигатели

Для привода шаровых мельниц, имеющих большой диаметр рабочего барабана, находят применение дугостаторные асинхронные двигатели. Как видно из рис. 6.7 дугостаторный асинхронный двигатель обеспечивает непосредственный привод барабана. Необходимая скорость вращения барабана  $\Omega_1$  реализуется на основе простого

соотношения  $\Omega_1 = \frac{\omega_1}{R\alpha} = 2f_1 \frac{\tau_1}{R}$ . Дугостаторные асинхронные двигатели находят

применение в качестве привода электропроигрывателей и других устройств. Имеются сведения о применении дугостаторных двигателей в координатных системах с позиционированием в различного рода графопостроителях, измерительных приборах и т.д.

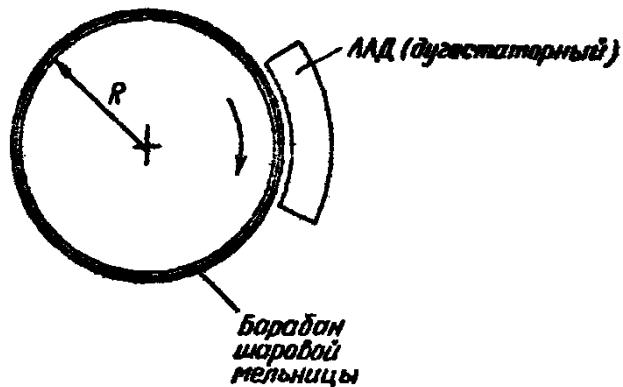


Рис. 5.7. Дугостаторный асинхронный двигатель

Торцевые асинхронные двигатели (ТАД) предназначены для привода бытовых механизмов (например стиральных машин) и приборов общепромышленного применения и при массовом производстве имеют сниженную примерно в 2,3 раза трудоемкость.

На рисунке 5.8 показаны основные узлы ТАД и их взаимное расположение. Статор в сборе содержит основание - магнитопровод в виде плоского диска и систему катушек с каркасами, закрепленными на плоском основании по окружности вокруг центрального отверстия для вала. Торцевые поверхности каркасов катушек, обращенные к рабочему зазору, образуют одну из двух рабочих поверхностей ТАД. Катушки электрически соединены между собой и образуют статорную обмотку. Материалом основания статора и каркасов катушек служит изотропный композиционный магнитный материал (КММ), обладающий необходимым комплексом магнитных, электрических и механических свойств. Ротор в сборе содержит основание - магнитопровод в виде диска, рабочая поверхность которого имеет выступы-полюсы, а также плоский металлический диск с системой отверстий. Эти отверстия равномерно расположены вокруг центрального отверстия и служат для разделения тела диска на систему электрически проводящих участков - проводников, образующих короткозамкнутую обмотку ротора. Материалом основания ротора является КММ, материалом диска - металл с высокой удельной электрической проводимостью, например алюминий. Количество, форма и геометрические размеры отверстий в металлическом диске точно соответствуют количеству, форме и размерам выступов в основании - магнитопроводе. При сборке ротора выступы основания помещаются в отверстия металлического диска. Высота выступов соответствует толщине плоской части диска, поэтому после сборки ротора торцевые поверхности выступов образуют с плоскостью диска рабочую поверхность, параллельную рабочей поверхности статора. Сборный ротор жестко фиксируется на валу с помощью втулки. Эта втулка соединяется с валом, например при помощи штифта, и к ней жестко крепится металлический диск. Концы вала установлены в подшипники, установленные в левой и правой половинах цилиндрического корпуса. В данной конструкции предусмотрены плоские шайбы на концах вала у подшипников, с помощью которых регулируется рабочий зазор.

Электромагнитный момент и мощность ТАД зависят от интенсивности магнитного поля в рабочем зазоре, от интенсивности вихревых токов в короткозамкнутой обмотке ротора и от длины радиальных участков - проводников короткозамкнутой обмотки. Для увеличения момента и мощности ТАД необходимо увеличивать длину радиальных проводников короткозамкнутой обмотки ротора, а также увеличивать интенсивность вихревых токов в этой обмотке. Для этого в данной конструкции ТАД металлический диск имеет чашеобразную форму. Наружный кольцевой край диска, замыкающий радиальные проводники обмотки, отогнут под прямым углом к плоской поверхности диска, на которой расположены радиальные проводники, и образует совместно с плоской поверхностью чашу, в которой размещается основание - магнитопровод ротора. Наружный край металлического диска и его внутренний кольцевой край, являющиеся замыкателями радиальных проводников, имеют в данной конструкции малое электрическое сопротивление по сравнению с сопротивлением радиального проводника, что способствует увеличению интенсивности вихревых токов в обмотке ротора. При этом в заданных габаритах электродвигателя увеличивается не только длина радиальных проводников короткозамкнутой обмотки ротора, но и увеличивается площадь полюсов - торцевых поверхностей выступов основания ротора, что также увеличивает момент и мощность ТАД. Чашеобразная конструкция металлического диска повышает механическую прочность всей конструкции ротора, что особенно важно для высокоскоростных ТАД.

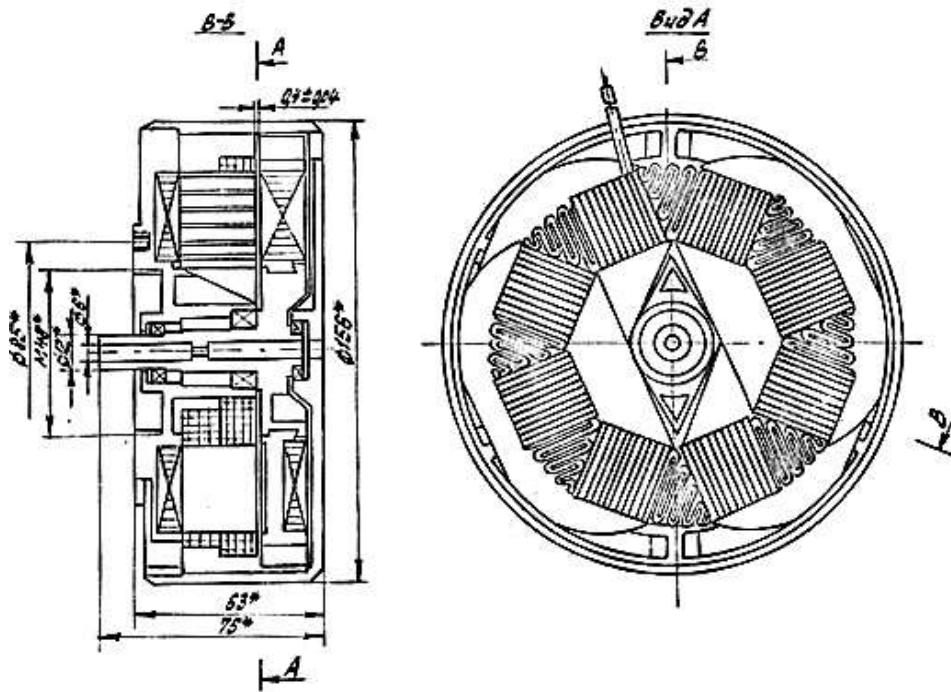


Рис 5.8 Торцевой асинхронный электродвигатель

Плоские поверхности монолитных деталей статора и ротора ТАД технологически сложно обработать с высокой точностью. Это гарантирует возможность обеспечить малый рабочий зазор в ТАД и способствует повышению его мощности. Этот зазор в ТАД регулируется плоскими шайбами, помещенными на концах вала у подшипников.

Обмотка статора ТАД образована путем электрического соединения выводов отдельных простых катушек, поэтому у данной обмотки в отличие от обмотки статора обычного (не торцевого) асинхронного электродвигателя отсутствуют лобовые части, что существенно снижает расход обмоточных проводов.

## 1.6 Лекция № 6, 7 (4 часа)

Тема: «Основы электропривода»

### 1.6.1. Вопросы лекции

1. Понятие и определения электропривода
2. Историческое развитие электропривода
3. Классификация электроприводов
4. Основное уравнение движения электропривода
5. Механические характеристики

### 1.6.2. Краткое содержание вопросов

1. Понятие и определения электропривода

Любое производственное устройство или механизм с приводом рабочих органов от электродвигателя (рис. 6.1) состоит:

- из рабочей машины;
- электродвигателя;
- передаточного механизма или трансмиссии;
- устройства управления;
- устройства преобразования параметров напряжения, подаваемого на зажимы электродвигателя.

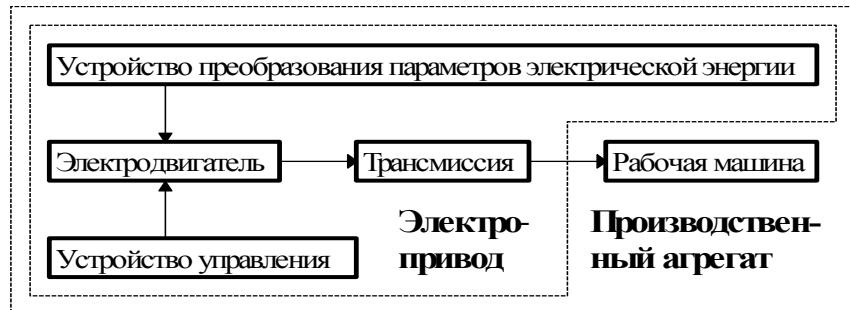


Рис. 6.1: Структурная схема электрифицированного производственного агрегата

Электрическая энергия из питающей электрической сети поступает на зажимы электродвигателя в общем случае через преобразователь, с помощью которого параметры подводимой энергии (напряжение, частота) приводятся в соответствие с теми параметрами, на которые рассчитан электродвигатель. Электродвигатель преобразует электрическую энергию в необходимую для действия рабочей машины механическую энергию. Последняя с вала электродвигателя поступает на приводной вал машины через трансмиссию, в которую могут входить муфты, валы, ремни, шестерни и другие элементы трансмиссии. Благодаря этому рабочая машина осуществляет технологический процесс, т. е. целенаправленно воздействует своими рабочими органами на перерабатываемый продукт. Управление технологическим процессом осуществляется устройством управления, действующим на поток электрической энергии от сети к электродвигателю. В простейшем случае действие осуществляется с помощью силовых контактов контакторов или магнитных пускателей.

Определение электрического привода как технического устройства дано в ГОСТ 16593-79 «Электроприводы. Термины и определения». Электрическим приводом называется электромеханическое устройство, предназначенное для приведения в движение рабочих органов машин и управления их технологическими процессами, состоящее из передаточного устройства, электродвигательного устройства, преобразовательного устройства и управляющего устройства.

Мощность, развиваемая рабочими органами во всех случаях, несмотря на их многообразие, характеризуется произведением силы и скорости воздействия рабочих органов на перерабатываемый продукт

$$P_{PO} = F_{PO} v_{PO} \quad (6.1)$$

или, если рабочий орган вращающийся, произведением вращающего момента, приложенного к нему, и частоты вращения

$$P_{PO} = M_{PO} \omega_{PO}. \quad (6.2)$$

Иногда она равна, а чаще всего больше полезной мощности, необходимой для требуемого по технологическим условиям изменения внутренней энергии перерабатываемого или перемещаемого продукта,

$$P_n = P_{PO} \eta_{PO}, \quad (6.3)$$

Мощность на приводном валу рабочей машины превосходит мощность рабочего органа на величину потерь мощности  $\Delta P_M$  внутри машины

$$P_M = M_{CM} \omega_M = P_{PO} + \Delta P_M = P_{PO} / \eta_M = P_n / \eta_{PO} \eta_M. \quad (6.4)$$

Аналогично, мощность на валу электродвигателя

$$P_2 = M_{CD} \omega_D = P_M + \Delta P_{TP} = P_M / \eta_{TP} = P_n / \eta_{PO} \eta_M \eta_{TP} \quad (6.5)$$

а мощность на зажимах

$$P_1 = mUICos\varphi = P_2 + \Delta P_D = P_2 / \eta_D = P_n / \eta_{PO} \eta_M \eta_{TP} \eta_D, \quad (6.6)$$

где  $\eta_{po}$ ,  $\eta_m$ ,  $\eta_{tr}$  и  $\eta_d$  → соответственно коэффициент полезного действия рабочего органа, передаточной части машины, трансмиссии и электродвигателя;

$\Delta P_m$ ,  $\Delta P_{tr}$  и  $\Delta P_d$  → потери мощности внутри машины, в трансмиссии и в электродвигателе;

$M_{cm}$  и  $M_{cd}$  → моменты сопротивления рабочей машины на приводном валу машины и на валу электродвигателя;

$m$ ,  $U$ ,  $I$  и  $Cos\varphi$  → число фаз, напряжение, ток и коэффициент мощности электродвигателя.

## 2. Историческое развитие электропривода

Одной из самых ранних вех в зарождении электропривода следует считать осуществление в 1821 году Фарадеем вращения электромагнита вокруг прямолинейного проводника с током, что по существу явилось созданием прообраза электродвигателя.

Уже вскоре после этого в 1835 году русский академик Якоби построил первый электродвигатель постоянного тока и применил его для привода гребных колёс лодки, которая при испытаниях перемещалась по Неве со скоростью 2,5 км/час.

Однако поистине революционное значение в становлении электропривода явилось изобретение русским инженером Доливо-Добровольским в 1891 году бесколлекторного асинхронного двигателя и создание для него системы переменного трёхфазного тока. Вследствие своей простоты и вытекающей из этого высокой надёжности трёхфазного асинхронного двигателя он получил преимущественное распространение для привода машин как в промышленности, так и в сельском хозяйстве. Именно с момента создания асинхронного электродвигателя начался интенсивный перевод технологических машин на электропривод, и его постоянное совершенствование. В процессе повышения технического уровня электропривода чётко просматривается ряд этапов, характеризующих степень его совершенства.

На первом этапе, когда электрический привод пришёл на смену паровому приводу, чаще всего путём простой замены паровой машины электрическим двигателем, преимущественное распространение получил общетрансмиссионный электропривод. При этом один электрический двигатель приводил в движение все рабочие машины предприятия или группу рабочих машин, а распределение механической энергии осуществлялось с помощью различного рода механических трансмиссий, проходящих по этажам и цехам предприятия.

Трансмиссионный электропривод из-за громоздкости и неудобств, связанных с размещением машин, был сравнительно быстро вытеснен одиночным электроприводом отдельных рабочих машин, при котором для каждой рабочей машины устанавливался свой электродвигатель. В связи с этим исчезали внешние цеховые трансмиссии, однако оставались трансмиссии внутри машин от приводного вала до рабочих органов. В настоящее время он широко используется в сельском хозяйстве. Одиночный электропривод совершенствуется в направлении упрощения трансмиссии и конструктивного сближения с рабочей машиной, преобразуясь из простого одиночного в индивидуальный одиночный электропривод.

Если в трансмиссионном электроприводе один электродвигатель обслуживает группу машин, то в одиночном - группу рабочих органов машины. Это общее свойство позволяет объединить их под одним общим названием - групповой электропривод. Групповым электроприводом называется электропривод, при котором один электродвигатель приводит в движение несколько рабочих машин или несколько рабочих органов одной машины. Главным недостатком группового электропривода является невозможность управления технологическим процессом с помощью системы управления электроприводом. Для пуска в ход, останова и регулирования частоты вращения

отдельных машин и рабочих органов требуются специальные механические устройства - управляемые муфты, коробки передач, фрикционны и т. п..

Рост единичной мощности технологических установок, необходимость автоматизации рабочих процессов машин и технологических линий, стремление к упрощению кинематики машин привели к замене группового электропривода индивидуальным. Индивидуальным электроприводом называется электропривод, при котором каждый рабочий орган машины приводится в движение отдельным электрическим двигателем. В зависимости от наличия трансмиссии между электродвигателем и рабочим органом индивидуальный электропривод подразделяется на простой индивидуальный и более совершенный особо индивидуальный.

### 3. Классификация электроприводов

В соответствии с ГОСТ - 16593 ЭП классифицируются по следующим характеристикам:

По количеству и связи исполнительных; рабочих органов.

1. Индивидуальный, в котором рабочий исполнительный орган приводится одним самостоятельным двигателем, приводом.

2. Групповой, в котором один двигатель приводит в действие исполнительные органы РМ или несколько органов одной РМ.

3. Взаимосвязанный, в котором два или несколько ЭМП или ЭП электрически или механически связаны между собой с целью поддержания заданного соотношения или равенства скоростей, или нагрузок, или положения исполнительных органов РМ.

4. Многодвигательный, в котором взаимосвязанные ЭП, ЭМП обеспечивают работу сложного механизма или работу на общий вал.

5. Электрический вал, взаимосвязанный ЭП, в котором для постоянства скоростей РМ, не имеющих механических связей, используется электрическая связь двух или нескольких ЭМП.

По типу управления и задаче управления.

1. Автоматизированный ЭП, управляемый путем автоматического регулирования параметров и величин.

2. Программно-управляемый ЭП, функционирующий через посредство специализированной управляющей вычислительной машины в соответствии с заданной программой.

3. Следящий ЭП, автоматически отрабатывающий перемещение исполнительного органа РМ с заданной точностью в соответствии с произвольно меняющимся сигналом управления.

4. Позиционный ЭП, автоматически регулирующий положение исполнительного органа РМ.

5. Адаптивный ЭП, автоматически избирающий структуру или параметры устройства управления с целью установления оптимального режима работы.

По характеру движения.

1. ЭП с вращательным движением.

2. Линейный ЭП с линейными двигателями.

3. Дискретный ЭП с ЭМП, подвижные части которого в установленном режиме находятся в состоянии дискретного движения.

По наличию и характеру передаточного устройства.

1. Редукторный ЭП с редуктором или мультиплексором.

2. Электрогидравлический с передаточным гидравлическим устройством.

3. Магнитогидродинамический ЭП с преобразованием электрической энергии в энергию движения токопроводящей жидкости.

По роду тока.

1. Переменного тока.

2. Постоянного тока.

По степени важности выполняемых операций.

1. Главный ЭП, обеспечивающий главное движение или главную операцию (в многодвигательных ЭП).

2. Вспомогательный ЭП.

Ниже приведена классификационная схема электроприводов по признаку сближения с рабочей машиной

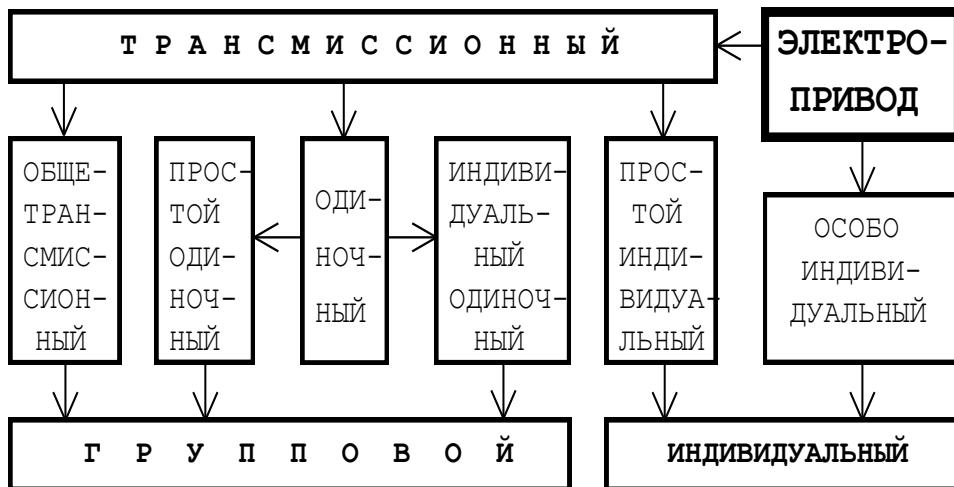


Рис. 6.2: Классификационная схема электропривода по степени сближения с рабочей машиной.

#### 4. Основное уравнение движения электропривода

В соответствии с законом Ньютона разность действующей на тело и противодействующей сил равна динамической силе, равной, в свою очередь, произведению массы тела на ускорение

$$F_d - F_c = F_{\text{дин}} = ma = m \frac{dv}{dt}. \quad (6.7)$$

Если тело с массой  $m$  совершает вращательное движение по радиусу  $r$ , то

$v = \omega r$ , а  $a = \varepsilon r$ , где  $\varepsilon$  - угловое ускорение, равное  $\frac{d\omega}{dt}$ . Тогда для вращательного движения, умножив левую и правую части уравнения на  $r$ , получим

$$M_d - M_c = M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (6.8)$$

где  $J$  – момент инерции,  $\text{кгм}^2$ .

Применимально к системе электропривода под моментом инерции понимается суммарный момент инерции всех движущихся частей электропривода, приведённый к валу электродвигателя.  $M_d$  - момент вращающий, развиваемый электродвигателем на валу,  $M_c$  - статический момент сопротивления рабочей машины на этом же валу. Как момент электродвигателя, так и момент рабочей машины в общем случае зависят от частоты вращения, т.е. являются функциями частоты вращения. Обозначив наличие такой зависимости, получим уравнение в окончательном виде

$$M_d(\omega) - M_c(\omega) = M_{\text{дин}}(\omega) = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (6.9)$$

Данное уравнение называется основным уравнением движения электропривода, в которое входят две переменные величины: частота вращения и время. Анализируя

уравнение, не трудно заметить, что система электропривода находится в состоянии равномерного движения (ускорение равно нулю) при равенстве моментов электродвигателя и рабочей машины. При этом частота вращения имеет постоянное (установившееся) значение. И наоборот, система находится в переходном состоянии от одной установившейся частоты вращения к другой частоте вращения, если момент электродвигателя больше момента сопротивления рабочей машины (ускорение) или если момент сопротивления больше момента электродвигателя (замедление).

Решение данного дифференциального уравнения относительно переменных (частоты вращения и времени) позволит получить зависимость частоты вращения от времени  $\omega = f(t)$ . Эта зависимость называется кривой разбега. Если выразить время в явном виде, то это зависимость времени, необходимого для разбега системы электропривода от начальной частоты вращения до  $\omega$ . Она является ключевой для решения многих вопросов при выборе электродвигателя к той или иной рабочей машине.

Во-первых, она необходима для расчёта длительности переходных периодов в технологических процессах, связанных с частыми пусками, остановками, реверсированием и регулированием частоты вращения рабочих органов машин, реализующим эти процессы. Во-вторых, для оценки степени перегрева электродвигателя за счёт дополнительного выделения тепла в переходных режимах. В-третьих, для определения порогов срабатывания (уставок) защитных и пусковых аппаратов, устанавливаемые одни для защиты цепей электродвигателя и питающей электрической сети от перегрузки, другие - для переключения ступеней пусковых и регулирующих реостатов в цепях электродвигателя.

### 5. Механические характеристики

Как уже было показано выше в основное уравнение движения электропривода входят зависимости моментов электродвигателя и рабочей машины от частоты вращения. Эти зависимости называются механическими характеристиками. Соответственно, механической характеристикой электродвигателя называется зависимость вращающего момента, развиваемого электродвигателем на его валу от частоты вращения

$M_d = f(\omega)$  или  $M_d(\omega)$ . Механической характеристикой рабочей машины называется зависимость момента сопротивления на валу рабочей машины от частоты вращения вала машины  $M_{cm} = f_m(\omega_m)$  или  $M_{cm}(\omega_m)$ . Например,  $M_{cm} = 54 + 6\omega$ . Решить основное уравнение движения электропривода можно лишь тогда, когда будут известны эти характеристики.

Механические характеристики могут быть заданы математическим выражением, таблицей или графиком. Например, на рисунке 4а приведен график одной из таких характеристик. В каждой точке характеристика имеет свой наклон к оси  $\omega$ . Чем круче характеристика, тем она считается жёстче. Жёсткостью характеристики в данной точке (обозначается символом  $\beta$ ) называется тангенс угла наклона характеристики в этой точке к оси  $\omega$ , равный производной характеристики в данной точке по  $\omega$

$$\beta = \tan \alpha = dM/d\omega \approx \Delta M / \Delta \omega \quad (6.7)$$

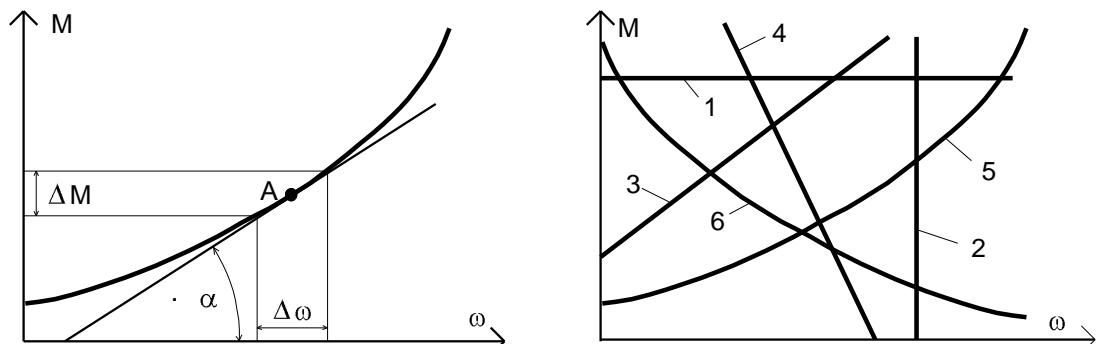


Рис. 6.4: Механические характеристики некоторых рабочих машин и электродвигателей.

Вид механических характеристик зависит от типов конкретно рассматриваемых электродвигателей и конкретно рассматриваемых рабочих машин. Например, на рисунке 4б показаны возможные виды таких характеристик. Характеристики 1, 2, 3 и 4 – прямолинейные. Их жёсткость во всех точках одинакова. Характеристики 3 и 5 – возрастающие, а характеристики 4 и 6 – падающие. Жёсткость первых из них больше нуля, а вторых – меньше нуля. Промежуточное положение среди них занимает механическая характеристика 1. Это абсолютно мягкая характеристика, жёсткость которой равна нулю. В противовес её характеристика 2 – абсолютно жёсткая (жёсткость равна бесконечности). Такой характеристикой обладает синхронный электродвигатель.

## 1.7 Лекция № 8, 9, 10, 11 (8 часов)

**Тема:** «Электропривод технологических машин и оборудования»

### 1.7.1. Вопросы лекции

1. Состояние и развитие электропривода в сельском хозяйстве.
2. Классификация сельскохозяйственных электроприводов по приводным характеристикам и режимам работы.
3. Электропривод станочного оборудования.
4. Основные виды и характеристики электроинструмента, используемого в сельскохозяйственном производстве.

### 1.7.2. Краткое содержание вопросов

1. Состояние и развитие электропривода в сельском хозяйстве.

Основной тип электропривода, используемого в отраслях агропромышленного комплекса (АПК), — асинхронный мощностью от десятка ватт до 200 кВт. В составе электроприводов мобильных установок с автономным аккумуляторным питанием, а также в качестве электропривода ручного электроинструмента широкое распространение получили коллекторные электроприводы с питанием от источников постоянного или переменного тока.

В электроприводах мощностью свыше 100 кВт, используемых, например, в оросительных системах, для электропривода мощных компрессоров и др. преимущественно применяют синхронные электроприводы.

С развитием автоматизации управления технологическими процессами АПК нарастает потребность в регулируемых электроприводах.

Современные электроприводы АПК, как правило, выполняют полностью комплектными. Их нетрудно преобразовать в замкнутые системы автоматического регулирования (САР) (рис 7.1).

Типичный пример комплектного электропривода (ЭП), широко используемого в составе систем автоматического регулирования, - автоматизированный ЭП отопительно-вентиляционных установок сельскохозяйственных производственных помещений (свинярников, картофелехранилищ, теплиц и т.д.), а также автоматизированный ЭП установок сельскохозяйственного водоснабжения.

Устройство управления электроприводом УУ может быть аппаратным или программным, например в виде управляющей микро-ЭВМ или программируемого микроконтроллера.

Современные системы электроприводов максимально удовлетворяют требованиям технологических машин, работающих в самых различных режимах по нагрузкам и частотам вращения. В них применяются специальные и встроенные электроприводы с программным управлением.

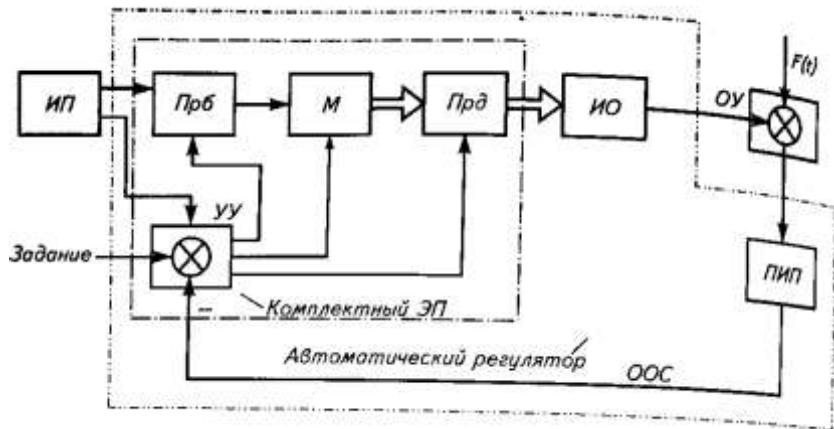


Рис. 7.1. Функциональная схема автоматического регулятора на основе комплексного электропривода.

## 2. Классификация сельскохозяйственных электроприводов по приводным характеристикам и режимам работы

Электрический привод применяют в различных отраслях сельского хозяйства, а также во вспомогательных производствах, в том числе по обслуживанию и ремонту сельскохозяйственной техники, по первичной переработке разнообразной продукции. Наиболее широко его используют в стационарных процессах производства, и прежде всего в животноводстве и птицеводстве. Именно в этих отраслях сельскохозяйственного производства электрический привод имеет наиболее высокий уровень автоматизации в системах отопления и вентиляции, в установках водоснабжения, приготовления и раздачи кормов. В растениеводстве электрический привод применяют в установках по очистке, сушке и сортировке зерна, при переработке и хранении картофеля и другой плодовоощной продукции. В теплицах и оранжереях электрический привод используют в системах обеспечения микроклимата помещений по выращиванию растений, для привода различных машин и механизмов для обработки почвы, в системах полива и подкормки растений. Применяют электрический привод для привода технологических установок подсобных предприятий и производств агропромышленного сектора, в частности в составе установок производства строительных материалов (пиломатериалов, кирпича, бетона и др.), а также в составе станочного оборудования ремонтных предприятий и мастерских. Многие виды работ в агропромышленном секторе выполняют с использованием инструмента, оснащенного электрическим приводом, что существенно повышает производительность и улучшает условия труда работающих.

Многочисленные технологические установки осуществляют в большинстве случаев однотипные технологические функции: водоснабжения, вентиляции, транспортирования, дробления. Поэтому при рассмотрении электроприводов

сельскохозяйственных машин, механизмов и установок целесообразно сгруппировать их по характерным признакам и для каждой группы выделить наиболее значимые из них.

По назначению конструктивным особенностям рабочих органов, по основным приводным характеристикам и режимам работы электроприводные машины и механизмы, используемые в сельском хозяйстве, условно подразделяют на восемь характерных групп: центробежные механизмы;

- грузоподъемные механизмы циклического действия;
- механизмы непрерывного транспорта;
- установки с кривошипно-шатунным механизмом;
- машины и установки первичной обработки продукции;
- мобильные и машинные установки;
- станочное оборудование;
- ручной инструмент.

#### Центробежные механизмы.

К группе электроприводных центробежных механизмов относят: различные центробежные насосы и вентиляторы, центрифуги, молочные сепараторы, ротационные вакуум-насосы, центробежные пневматические транспортеры и др.

Характерные особенности электроприводов центробежных механизмов:

- вентиляторная или близкая к ней механическая характеристика нагрузки;
- методы регулирования производительности (подачи) и инерционные характеристики;
- режимы работы и особенности автоматизации.

Грузоподъемные механизмы циклического действия. Группу электроприводных грузоподъемных механизмов циклического действия представляют всевозможные лебедки, тельферы, кран-балки, различные по назначению краны и экскаваторы с электрическим приводом.

Характерные особенности электроприводов грузоподъемных механизмов циклического действия:

- наличие независящего от скорости активного (однонаправленного) момента - статической нагрузки на валу электродвигателя привода подъема – опускания груза и соответственно оснащение электроприводов тормозными средствами;
- ограниченность области применения груза и соответственно оснащение системы управления путевыми (конечными) выключателями;
- необходимость ограничения ускорений механизма и получение малых скоростей перемещения, в том числе при нагрузках, близких к номинальной;
- малая инерционность электроприводов;

разнообразие режимов работы и использование толчковых схем управления электроприводами.

Механизмы непрерывного транспорта. Особенности группы электроприводов механизмов непрерывного транспорта, которую представляют электроприводы различных конвейеров и транспортеров, а также электроприводы поточно-транспортных линий (ПТЛ) и систем (ПТС):

- наличие замкнутого тягового органа и (или) непрерывная подача груза;
- относительно высокий момент трогания, особенно с нагрузкой;
- слабопеременная либо переменная нагрузка, которая практически не зависит от скорости перемещения грузопотока;
- малая инерционность электропривода;
- взаимосвязанность отдельных электроприводов.

Установки с кривошипно-шатунным механизмом. Кривошипно-шатунный механизм служит для преобразования вращательного движения в поступательное и наоборот. Поэтому таким механизмом оснащают технологические установки, в которых необходимо преобразование одного вида движения в другой, например поршневые

насосы и компрессоры, пильные рамы, всевозможные прессы, установки штампования, обкатки двигателей внутреннего сгорания и др.

Характерные особенности электропривода с кривошипно-шатунным механизмом:

- переменный момент инерции, степень неуравновешенности которого зависит от значения дополнительных маховых масс;
- затрудненные условия пуска, связанные, в частности, не только со значением нагрузки при пуске, а и с положением шатуна механизма относительно оси вращения кривошипа;
- необходимость применения дополнительных маховых масс и электродвигателей с мягкой механической характеристикой.

Машины и установки первичной обработки продукции. Как правило, большинство видов продукции растениеводства, животноводства и других отраслей сельского хозяйства подвергают первичной переработке непосредственно на местах ее производства. Кроме того, подобные установки используют для приготовления кормов, для предпосевной обработки семян различных культур и др. С этой целью применяют соответствующие специальные технологические агрегаты и установки с электрическим приводом.

Отличительные особенности данной многообразной группы электроприводов:

- большое разнообразие нагрузок случайно переменного характера;
- наличие нескольких рабочих органов в одном агрегате; необходимость в ручном или автоматическом регулировании загрузки.

Мобильные машины и установки. Электрический привод имеет ряд существенных преимуществ перед тепловым приводом на основе двигателей внутреннего сгорания (ДВС). По этой причине электропривод стал основным в стационарных технологических установках, его используют для привода мобильных машин и механизмов, где преобладающее значение имеет тепловой привод от ДВС. В частности, электроприводом оснащают различные мобильные раздатчики кормов, внутри складской и цеховой электротранспорт в виде электрокар, электромобилей и электропогрузчиков, энергонасыщенные мобильные установки с электротрансмиссией и др.

Отличительные особенности электропривода мобильных установок и машин:

- способ электропитания централизованный или автономный;
- вид электропитания (кабельный, троллейный, аккумуляторный, конденсаторный, электротрансмиссия и др.);
- необходимость реверсирования и регулирования скорости движения в широком диапазоне;
- большой диапазон неоднозначных нагрузок.

Станочное оборудование. Специализированное станочное оборудование с электрическим приводом используют в металлообрабатывающих и деревообрабатывающих мастерских и на вспомогательных производствах.

Характерные особенности этой группы электроприводных установок:

- большое разнообразие режимов работы электроприводов по нагрузке;
- использование комплектного унифицированного электрооборудования;
- строгое поддержание заданного технологического процесса.

Ручной инструмент. Ручные электрифицированные машины в виде различного электроинструмента используют в различных отраслях и вспомогательных производствах сельского хозяйства. Это прежде всего ручные стригальные машинки с электрическим приводом, электроинструмент по уходу за садовыми и овощными культурами, различные электродрели, режущие и шлифующие электрические машинки, электропилы и многое другое.

Отличительные особенности этой группы электроприводов:

- повышенная опасность поражения электрическим током и ухудшенные условия охлаждения, так как электроинструмент находится в руках работающего;

- неоднозначность нагрузок и режимов работы, которые определяются в значительной степени физическими данными работающего с электроинструментом и его квалификацией;
- широкий диапазон возможных условий окружающей среды.

Следует рассматривать электроприводы, используемые в сельском хозяйстве, именно по приводным характеристикам и особенностям работы, так как это позволяет выделить наиболее существенные свойства ЭП каждой группы.

### 3. Электропривод станочного оборудования

Необходимость в периодическом ремонте и обслуживании различной автотракторной и сельскохозяйственной техники, обеспечение всевозможных производств строительными материалами обусловили создание в структуре агропромышленного комплекса соответствующих ремонтных заводов, мастерских, цехов и производственных участков, оснащенных необходимым станочным оборудованием. Электрооборудование используемых станков в основном состоит из электропривода и системы местного освещения которыми станок комплектует изготовитель. Электропривод станков характеризуется многообразием возможных режимов работы по нагрузке от S1 до S8, необходимостью плавного или ступенчатого регулирования частоты вращения основных рабочих органов и их позиционирования. Преобладающий режим работы электроприводов главного привода станков по нагрузке — перемещающийся S6.

По основному виду обрабатываемого материала станки подразделяют на деревообрабатывающие и металлообрабатывающие. По характеру выполняемой работы различают станки сверлильные, токарные, фрезерные и пр. В мастерских сельскохозяйственного производства наибольшее распространение получили универсальные станки, позволяющие на одном станке выполнять различные виды станочных работ.

Для ряда станков по обработке материалов резанием (особенно круглопильных, ленточнопильных, фрезерных, шлифовальных) характерны высокие скорости резания: 20...100 м/с. В связи с большими скоростями резания рабочие валы таких станков имеют повышенные частоты вращения: 3...6 тыс. об/мин.

**Сверлильные станки.** Они предназначены для сверления и дальнейшей обработки отверстий. По расположению шпинделя их подразделяют на: вертикальные и горизонтальные, с постоянным положением оси шпинделя и радиальные. По числу шпинделей различают одношпиндельные и многошпиндельные станки.

Вертикально-сверлильный станок (рис. 7.2) — наиболее распространенный тип станка для дерево- и метало- обработки. Его используют для получения и обработки отверстий. Инструмент (сверло, зенкер, развертка и др.) закрепляют в вертикальном шпинделе, деталь — на столе станка. Оси обрабатываемого отверстия и инструмента совмещают перемещением детали. Для подготовки и обработки отверстий диаметром до 12 мм используют одношпиндельные настольные станки. Тяжелые и крупногабаритные детали а также детали с отверстиями, расположенными по дуге окружности обрабатывают на радиально-сверлильных станках. В деревообработке полмили распространение одно- и многошпиндельные вертикальные и горизонтальные сверлильные станки и станки с поворотным шпинделем, который может располагаться вертикально и горизонтально. На деревообрабатывающих станках сверлят отверстия, делают пазы, гнезда, удаляют сучки и т. п.

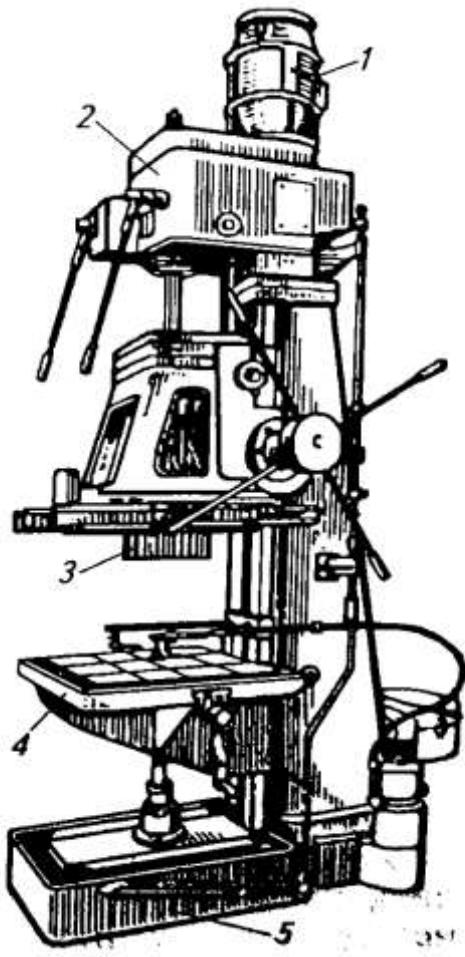


Рис. 7.2. Общий вид вертикально – сверлильного станка: 1 – электродвигатель привода; 2 – редуктор; 3 – шпиндель; 4 – вертикально перемещаемый стол; 5 – станина.

**Электроприводные токарные станки.** Их используют для изготовления и обработки деталей резанием, представляющих собой тела вращения. Применяя специальные приспособления, на токарном станке можно фрезеровать, шлифовать, нарезать зубья и др. В составе электропривода главного движения токарного станка используют одно- или многоскоростные асинхронные электродвигатели и многоступенчатые коробки скоростей или механический вариатор, либо регулируемый электропривод постоянного тока с коробкой скоростей.

**Электроприводные фрезерные станки.** Их применяют для изготовления и обработки резанием при помощи различных фрез плоских изделий, плоских и фасонных поверхностей, пазов, уступов, поверхностей тел вращения, зубьев, зубчатых колес и т. п.

**Оптимальная скорость резания.** На станках по обработке материалов резанием изделия обрабатывают при оптимальной скорости резания, которая зависит от твердости обрабатываемого материала, геометрических размеров режущего инструмента и обрабатываемого изделия, а также от характера обработки (предварительная, грубая или чистовая). Например, на сверлильных или токарных станках соответственно с изменением диаметра сверла или диаметра обрабатываемой заготовки  $d$ , мм, при постоянной частоте вращения сверла или заготовки  $n$ , об/мин, будет изменяться и скорость резания, которую можно представить в виде, м/мин:

$$v_{\text{рез}} = \frac{\pi d n}{100}, \quad (7.1)$$

где  $\pi = 3.14$ .

Из анализа следует, что для поддержания оптимальной скорости резания или в области оптимальной скорости резания необходимо с изменением диаметра сверла сверлильного станка, фрезы фрезерного станка или диаметра заготовки токарного станка измерять их длину вращения плавно или по минимуму ступенчато. На многих станках до настоящего времени по экономическим соображениям применяют односкоростные асинхронные электроприводы с короткозамкнутыми двигателями.

Мощность нагрузки  $P_x$ , Вт, на валу электродвигателя главного привода станка для обработки материалом резанием определяют на основе нагрузочной диаграммы двигателя, которую рассчитывают по наиболее напряженному по нагрузке технологическому процессу для рассматриваемого станка:

$$P_x = \frac{F_{pes} v_{pes}}{60\eta_{\Pi}}, \quad (7.2)$$

где  $F_{pes}$  - усилие резания, Н;  $v_{pes}$  - технологическая скорость резания, м/мин;  $\eta_{\Pi}$  - КПД механической передачи станка, принимаемый 0.7...0.85 для станков с вращательным движением рабочих органов и 0.4...0.5 для станков с вращательно-поступательным движением.

#### 4. Основные виды и характеристики электроинструмента, используемого в сельскохозяйственном производстве

Электроинструмент используют в металлообработке. Для механизации процесса рубки металлов применяют электрические рубильные молотки, у которых вращение вала электродвигателя преобразуется в возвратно-поступательное движение зубила, закрепленного на конце ударника. При резке металлов используют различные электрические ножовки, дисковые пилы, при резке листовой стали толщиной до 3 мм — электрические ножницы вибрационного типа, производительность которых достигает 3...6 м/мин. Они особенно удобны при резке по фигурному раскрою.

Для сверления и развертывания отверстий используют ручные сверлильные машины (электродрели) различных типов: легкие, средние и тяжелые для обработки отверстий диаметром соответственно до 9, 14 и 32 мм и угловые - для обработки отверстий в труднодоступных местах.

Для механизации процесса нарезания резьбы применяют электрорезьбонарезатели, оснащенные специальными насадками. При шабрении используют электромеханические шаберы и электрические шабровочные головки.

В деревообработке наиболее распространены:

- дисковые электропилы;
- цепные электропилы;
- электрорубанки;
- электрофрезы;
- электросверла;
- электродолбежники;
- сучкорезки.

Для выполнения различны сборочных и вспомогательных работ используют гайковерты, лобзики, шуруповерты, электромолотки, трамбовки и много другое. Для обработки почвы в сооружениях защищенного грунта используют электромотыги и электрофрезы, применение которых позволяет существенно облегчить и в несколько раз увеличить производительность труда по сравнению с ручной обработкой почвы.

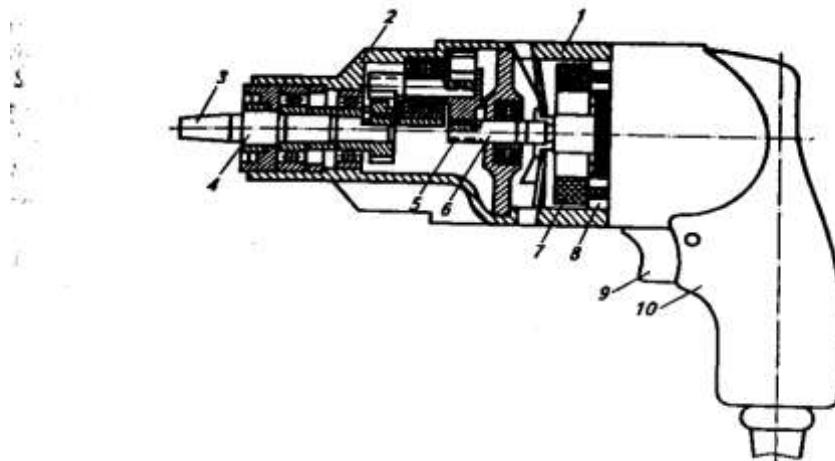


Рис. 7.3. Конструкция электродрели:

1 – корпус; 2, 5 – зубчатые пары редуктора; 3 – конус; 4 – рабочий вал; 6 – ведущий вал; 7 – статор; 8 – ротор; 9 – выключатель; 10 – рукоятка.

**Электродрели.** Наиболее распространенный вид ручных машин с электрическим приводом — сверлильный (электродрели). Их основное исполнение — прямые односкоростные. Кроме того, имеются многоскоростные со ступенчатым и с плавным регулированием частоты вращения, ударно-вращательные (перфораторы). Действующим стандартом установлены сверлильные машины по максимальному диаметру сверла: 6, 8, 9(10), 13(14), 23 и 32 мм. В машинах до 13 мм сверло закрепляют в патроне, насаженном на укороченном конусе шпинделя. В машинах 14...32 мм сверло устанавливают во внутренний конус шпинделя. В ряде случаев рассматривают различные приспособления и насадки, которые расширяют область применения сверлильных машин. На рисунке 9.3 приведена одна из возможных типовых конструкции электродрели. При необходимости плавное регулирование частоты вращения электродрели достигают применением встроенного в ручку дрели тиристорного регулятора напряжения. При этом курок выключателя воздействует на переменный резистор, являющийся задатчиком выходного напряжения тиристорного регулятора, на выходное напряжение которого включен электродвигатель привода дрели.

Ударно-вращательные сверлильные машины предназначены для сверления отверстий в камне, кирпиче, бетоне. Производительность при обработке этих материалов возрастает, когда резание сочетается с ударным скальванием.

**Шлифовальные и режущие электроприводные инструменты.** Их используют для обработки изделий шлифованием и полированием, строганием и для раскroя различных материалов с использованием соответствующих сменных насадок. Эти ручные машины, как правило, имеют защитный кожух, охватывающий режущий диск на дуге до  $180^\circ$  с указанием направления вращения шпинделя. Их выпускают на стандартизованные размеры режущих дисков: 40, 63,80, 100, 125, 150(180) и 200(230) мм. При этом скорость резания достигает 50...80 м/с.

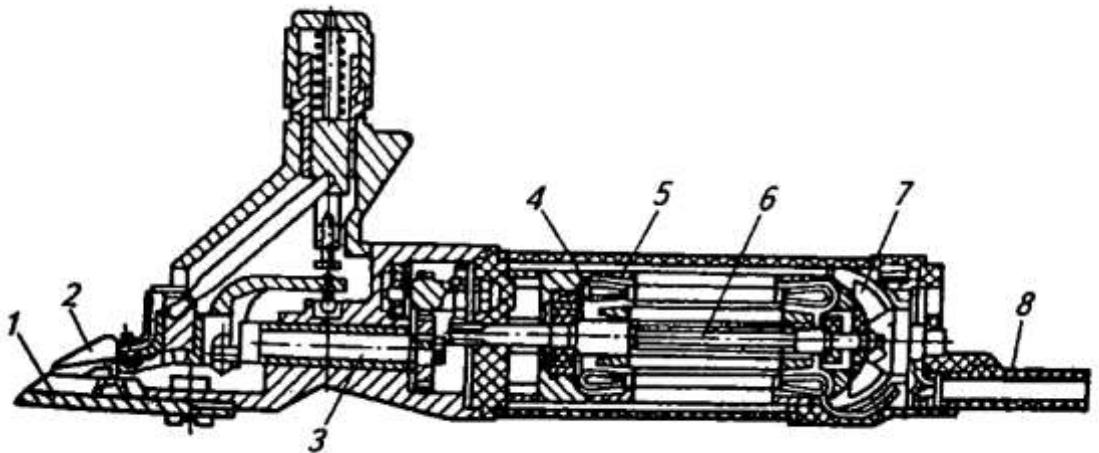


Рис. 7.4. Конструкция электроприводной машинки для стрижки овец типа МСУ – 200:

1 – гребенка; 2 – нож; 3 – вал привода; 4, 5, 6 – корпус, статор и ротор электродвигателя с приводной шестерней; 7 – вентилятор; 8 – шнур питания.

Высокочастотные стригальные электромашинки. Для электромеханизации трудоемкого процесса стрижки овец на овцеводческих фермах используют высокочастотные стригальные электромашинки типа МСУ-200 с приводом от трехфазного асинхронного двигателя с частотой 200 Гц, напряжением 36 В и мощностью 115 Вт (рис.7.4)

При питании электропривода стригальной машинки используют шнур от машинного или полупроводникового преобразователя частоты. При этом ее режущий аппарат совершает 2200 двойных ходов в минуту. В частности, за счет этого обеспечивается производительная и качественная стрижка.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### 2.1 Лабораторная работа №1 (4 часа).

**Тема:** «Изучение универсального лабораторного стенда»

**2.1.1 Цель работы:** изучить основы работы на универсальном фронтальном стенде.

**2.1.2 Задачи работы:** ознакомиться с универсальным фронтальным стендом и уяснить принцип сборки электрических схем на нем.

**2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории.

#### 2.1.4 Описание (ход) работы:

##### Методика проведения лабораторных работ

Групповые лабораторные работы организованы таким образом, что вся группа или подгруппа студентов, находящаяся в аудитории, изучает один и тот же объект и решает одну и ту же задачу по исследованию его свойств коллективно. При этом каждый выполняет свою часть общей работы под наблюдением всех остальных студентов, присутствующих в аудитории. Конечный результат решения поставленного в работе задания есть итог труда каждого участника эксперимента. Такая постановка работы в аудитории прививает выпускникам ВУЗа навыки работы в трудовых и творческих коллективах (отделах, бюро и пр.), решающих общие производственные, технические или

научные задачи и проблемы. Работы проводятся с использованием универсального лабораторного стенда.

### **Устройство универсального лабораторного стенда аудитории 210**

Универсальный лабораторный стенд размещён на фронтальной стене аудитории и представляет собой каркас с расположенным на нём панелями приборов и оборудования, набор которых достаточен для выполнения любой из лабораторных работ цикла. Выводы приборов и оборудования осуществлены на клеммы пронумерованных панелей, с помощью которых через соединительные провода с наконечниками приборы соединяются в схемы. Для соединения приборов, находящихся на противоположных сторонах стенда, служат переходные клеммы, расположенные на двух нижних рейках стенда, имеющие номера от 1 до 18 с каждой стороны стенда. Клеммы, имеющие одинаковый номер, соединены между собой проводом-удлинителем.

На стенде имеется 3 автоматических выключателя QF1...QF3, с помощью которых на стенд подаётся трёхфазное напряжение соответственно 21/36, 127/220 и 220/380 вольт, автоматический выключатель QF4 для подачи постоянного напряжения -25 – 0 +25 В и автоматические выключатели QF5 и QF6 для подачи переменного и постоянного напряжения соответственно 127 и 220 вольт. Сигнальные лампы, расположенные между выключателями, указывают на подачу напряжения до автоматических выключателей, а лампы, расположенные непосредственно у клемм – на наличие напряжения непосредственно на клеммах.

Перед фронтальным стендом (в центре аудитории напротив доски) смонтирован нагружочный стенд, основу которого составляет машина постоянного тока параллельного возбуждения (балансирная машина). Статор машины закреплён на подшипниках и имеет противовес, что обеспечивает поворот статора на определённый угол приложении к валу машины определённого врачающего момента. По углу отклонения при соответствующей тарировке легко определяется момент на валу машины. С валом нагружочной машины соединяется вал испытуемой машины (вентилятора, генератора, электродвигателя) и производится экспериментальное определение её характеристик на различных частотах вращения. Для питания нагружочной машины и для питания испытуемой машины имеется также расположенные рядом две спарки типа «генератор-двигатель». Выводы всех этих машин осуществлены на панели фронтального стендса.

### **Методика тарировки весового механизма для измерения врачающего момента**

Для измерения врачающего момента, развиваемого электродвигателем, часто используется балансирный механизм, по углу отклонения которого можно судить о величине развиваемого момента. Для этой цели механизм должен быть соответствующим образом отградуирован и оттарирован. В условиях лаборатории проще всего градуировку шкалы указателя момента осуществить равномерно по всей шкале, например, в миллиметрах. Тарировку такой шкалы проще всего провести следующим образом.

К плечу  $R_t$  балансирного устройства, длину которого предварительно измеряют, прикладывается сила  $F_t$ , такой величины, чтобы стрелка указателя момента отклонилась не менее, чем на 2/3 максимальной длины шкалы (См. рисунок). Количество делений шкалы  $N_t$ , на которое стрелка отклонилась, фиксируется и рассчитывается соответствующая отклонению длина дуги шкалы

$$L_t = N_t / \mu_{ш},$$

где  $\mu_{ш}$  - масштаб шкалы, дел./м. Так, если деления на шкале нанесены или пронумерованы через каждый миллиметр  $\mu_{ш} = 1000$  дел./м.

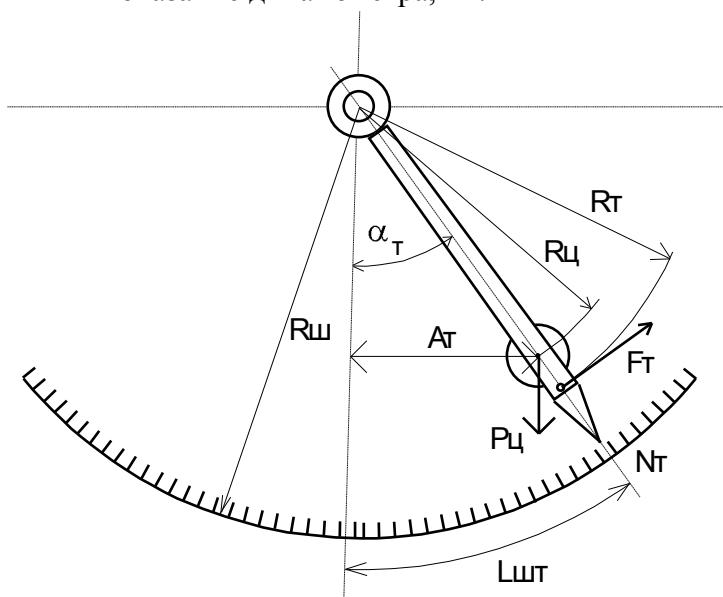
Измеряется также радиус дуги шкалы  $R_{ш}$  в метрах.

Измерение силы осуществляется динамометром или взвешиванием грузов, с помощью которых эта сила обеспечивается. При этом

$$F_t = 9,81 m_t \text{ (Нм)} \text{ или } F_t = 9,81 F_{\text{тд}} \text{ (Нм)},$$

где  $m_t$  - масса грузов, кг;

$F_{\text{тд}}$  - показание динамометра, кГ.



**Рис. 1: Кинематическая схема к тарировке балансирующего устройства.**

Приложенный при тарировке момент

$$M_t = F_t * R_t \text{ (Нм)}$$

уравновешивается противодействующим моментом, равным произведению веса балансирующего устройства  $P_{\text{ц}}$  на смещение  $A_t$  центра тяжести от вертикальной линии, проходящей через ось балансирующего устройства

$$M_t = M_{\text{пп}} = P_{\text{ц}} A_t = P_{\text{ц}} R_{\text{ц}} \sin \alpha_t = P_{\text{ц}} R_{\text{ц}} \sin \frac{L_{\text{пп}}}{R_{\text{ш}}} = P_{\text{ц}} R_{\text{ц}} \sin \frac{N_t}{\mu_{\text{ш}} R_{\text{ш}}}.$$

Откуда

$$P_{\text{ц}} R_{\text{ц}} = M_t \left/ \sin \frac{N_t}{\mu_{\text{ш}} R_{\text{ш}}} \right.$$

Тогда момент при произвольном отклонении стрелки

$$M = P_{\text{ц}} R_{\text{ц}} \sin \frac{N}{\mu_{\text{ш}} R_{\text{ш}}} = \frac{M_t}{\sin \frac{N_t}{\mu_{\text{ш}} R_{\text{ш}}}} \sin \frac{N}{\mu_{\text{ш}} R_{\text{ш}}}.$$

Например, при тарировке стенда для исследования пусковых свойств асинхронного электродвигателя сила  $F_t$  создавалась весом груза, подвешенного через шкив. При этом были измерены и получены следующие данные:  $R_t = 0,415 \text{ м}$ ;  $m_t = 0,31 \text{ кг}$ ;  $N_t = 194 \text{ дел}$ ;  $R_{\text{ш}} = 0,473 \text{ м}$ ;  $\mu_{\text{ш}} = 1000 \text{ дел/м}$  (деления на шкале пронумерованы через 1 мм, нанесены через 5 мм). Подставив эти данные в уравнение момента, получим

$$M = \frac{9,81 * 0,31 * 0,415}{\sin \frac{194}{1000 * 0,473}} \sin \frac{N}{473} = 3,16 \sin \frac{N}{473}$$

Таким образом, если при измерении стрелка отклонилась на  $N$  делений, то искомый момент, действующий на весовой механизм,

$$M = 3,16 \sin \frac{N}{473} (\text{Нм}),$$

где  $\frac{N}{473}$  - угол отклонения стрелки в радианах.

#### **Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ**

Используемое на лабораторном стенде напряжение опасно для жизни и может привести к смертельному исходу. В связи с этим при выполнении лабораторных работ необходимо выполнять следующие меры предосторожности:

Перед началом работы убедитесь, что все автоматические выключатели отключены;

Включение экспериментальной схемы осуществлять после проверки и по разрешению преподавателя в строго регламентированной в инструкции последовательности;

При работе со схемой не прикасаться к токоведущим частям оборудования, проводам и клеммам;

Изменение режимов работы оборудования и его отключение осуществлять в соответствии с приведённой в методическом указании инструкцией;

Перед разборкой схемы, убедитесь, что все вводные автоматические выключатели обесточены;

По окончании работы схему разобрать полностью, провода убрать на место хранения.

#### **Правила сборки электрических схем**

Преподаватель распределяет узлы собираемой схемы по исполнителям.

Получив задание на сборку определённого узла схемы, очередной студент выполняет следующие действия:

1. Каждую клемму, входящую в узел, последовательно:

показывает указкой на плакате;

называет выводом какого элемента и какого аппарата она является;

находит и показывает всем студентам эту клемму на стенде.

2. После того как все клеммы, входящие в узел, будут перечислены, указка откладывается в сторону, берутся соединительные провода и производится сборка в следующем порядке:

Выбирается самая левая клемма на стенде из показанных и присоединяется к ней наконечник провода, длина которого достаточна для присоединения к ближайшей клемме, расположенной правее;

К этой клемме добавляется наконечник следующего провода, длина которого достаточна для присоединения к клемме расположенной правее;

Действия повторяются, пока не будут соединены все клеммы, входящие в узел.

Примечание. При недостаточной длине проводов можно соединить два провода последовательно с помощью свободных клемм на аппаратах, не связанных с собираемой цепью электрически. При переходе на правую часть стенда воспользоваться переходными клеммами стенда. Клеммы следует закручивать плотно, но не чрезмерно.

#### **Основные правила составления и чтения схем электроустановок**

##### **Определение, виды и типы схем**

**Специальные чертежи**, на которых отображаются различные цепи устройств и установок, а также сообщаются сведения о их монтаже и эксплуатации, называются **схемами**.

**Схема** – это графический конструкторский документ, на котором при помощи условных графических обозначений (**УГО**) изображены электрические, механические, гидравлические, пневматические и другие **составные части** изделия и **связи** между ними.

В зависимости от **вида** элементов, входящих в устройство, различают схемы:

Кинематические – **K**;

Пневматические – **П**;

Гидравлические – **Г**;

Электрические - **Э**;

Комбинированные – **C**.

В зависимости от **назначения** различают следующие **типы** схем:

Структурные - **1**;

Функциональные – **2**;

Принципиальные (полные) – **3**;

Монтажные (соединений) - **4**;

Подключения - **5**;

Общие - **6**;

Расположения - **7**.

При выполнении лабораторных работ в основном будут необходимы электрические принципиальные и монтажные схемы.

**Электрическая принципиальная схема** (**Э3**) включает в себя **полный состав** электрических **элементов** устройства и определяет **взаимосвязь** между элементами в устройстве. **Используется** эта схема для изучения принципа работы устройства, а также при его наладке, регулировке, контроле и ремонте. По ней могут быть составлены другие схемы, например, монтажная схема.

**Электрическая монтажная схема** (**Э4**) показывает размещение элементов в устройстве, способы и пути их соединения, места соединения. **Она служит** в основном для установки и соединения элементов при монтаже, но может использоваться и при наладке.

Основные правила выполнения и чтения электрических схем, а также условные графические обозначения элементов электрооборудования и их позиционные обозначения были изучены на втором курсе по дисциплине «Монтаж электрооборудования и средств автоматизации»

## 2.2 Лабораторная работа №2 (4 часа).

**Тема:** «Исследование электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения»

**2.2.1 Цель работы:** Научиться производить сборку схемы, осуществлять запуск электродвигателя, производить регулирование частоты вращения, изменять устанавливать и измерять параметры режимов работы.

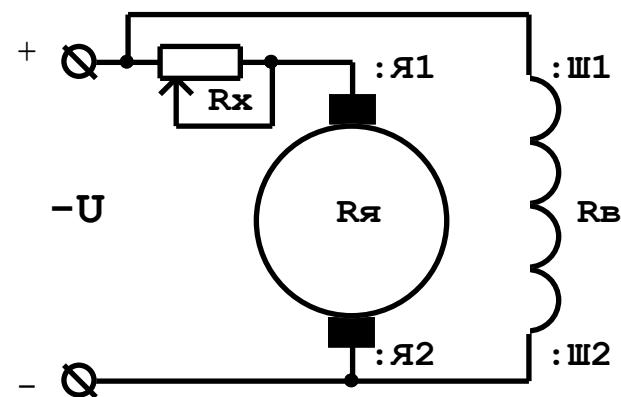
**2.2.2 Задачи работы:** Снять зависимость частоты вращения электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения от напряжения на якоре на холостом ходу.

**2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории

**2.2.4 Описание (ход) работы:**

Электродвигатель постоянного тока параллельного возбуждения (шунтовой) имеет расположенную на полюсах статора обмотку возбуждения, выполненную из большого количества витков медного изолированного провода, и многосекционную обмотку якоря, уложенную по окружности в пазы железа якоря, набранного из отдельных, изолированных друг от друга листов электротехнической стали. Секции соединены между собой последовательно. Точки соединения секций выведены на пластины коллектора. Подвод тока к коллектору производится через угольные, графитовые или медно-

графитовые щётки. Условное графическое обозначение, маркировка выводов и подключение к сети шунтового ЭД осуществляется следующим образом:



**Рис. 1: Схема включения электродвигателя.**

Под действием приложенного напряжения через обмотку возбуждения протекает ток возбуждения  $I_B = U/R_B$ , который создают между полюсами статора магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий обмотку якоря. В обмотке якоря под действием этого же напряжения возникает пусковой ток  $I_{Яп} = U/(R_я + R_x)$ . В результате взаимодействия тока и магнитного потока образуется пусковой вращающий момент  $M_p = k\Phi I_{Яп}$ , где  $k$ - конструктивный коэффициент машины, учитывающий размеры, число витков и тип обмотки. При этом якорь стронется с места и начнёт увеличивать частоту вращения  $\omega$ .

Пересечение витками обмотки якоря силовых линий магнитного поля вызовет наведение в обмотке электродвижущей силы  $E = k\Phi\omega$ , направленной навстречу приложенному к обмотке напряжению. Поэтому ток якоря и, следовательно, вращающий момент уменьшатся соответственно до  $I_я = (U - E)/(R_я + R_x)$  и  $M = k\Phi I_я$ . Уменьшение будет происходить до тех пор пока развиваемый электродвигателем момент не сравняется с моментом сопротивления рабочей машины, связанной с валом электродвигателя.

Механическая характеристика электродвигателя  $M = f(\omega)$  или  $\omega = f(M)$  описывается уравнением прямой линии

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_я + R_x}{(k\Phi)^2} M , \quad (1)$$

Анализ уравнения показывает, что на холостом ходу, угловая частота прямо пропорциональна приложенному напряжению. Дополнительная литература

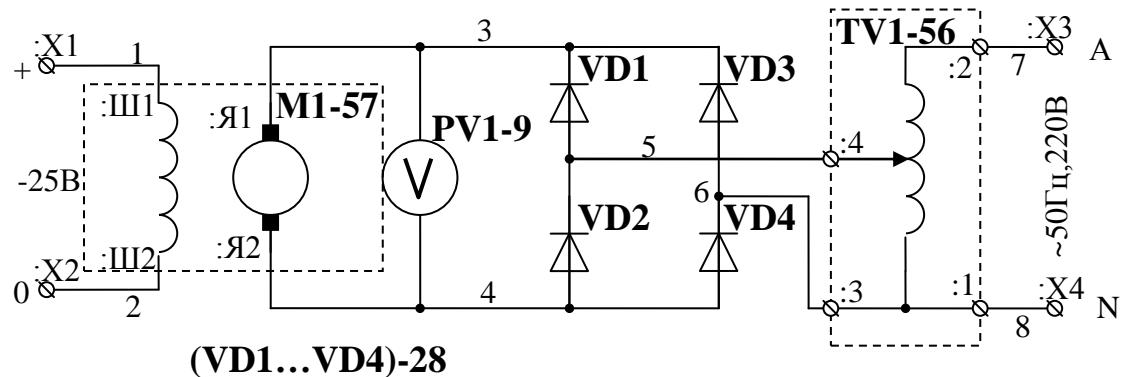
Лекция по теме: «Механические характеристики и регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения».

Порядок выполнения задания

Знакомимся с основными техническими данными и расположением оборудования

Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии

**Собираем электрическую схему:**



**Рис.2: Принципиальная схема установки для испытания электродвигателя.**

**Заготавливаем таблицу записи наблюдений:**

**Данные опытов и расчётов**

**Таблица 2**

Исполнитель									
U, В	10	15	20	25	30	35	40	45	50
n, об/мин									
ω, 1/c									

**Записываем действия при определении параметров точек экспериментальной зависимости, заданных второй строкой таблицы 2:**

- а) Устанавливаем заданное напряжение;
- б) Измеряем тахометром скорость вращения вала электродвигателя в оборотах в минуту;
- в) Рассчитываем и заносим в таблицу частоту вращения;

**Осуществляем запуск электродвигателя в следующей последовательности:**

- а) Подадим напряжение постоянного тока 25 вольт на клеммы обмотки возбуждения.
  - б) Установим движок автотрансформатора TV1 в нулевое положение (против часовой стрелки до упора, что соответствует нижнему положению движка автотрансформатора на схеме).
  - в) Подадим напряжение 220 вольт на вход автотрансформатора.
  - г) Медленно увеличиваем напряжение на выходе автотрансформатора, следя за тем, чтобы электродвигатель начал вращаться (неподвижность якоря при напряжении 10 и более вольт может свидетельствовать об аварийном режиме: отсутствии тока в обмотке возбуждения или замыкании или обрыве цепи якоря).
  - д) Доводим напряжение до 20...30 вольт
- Работу выполняет очередной студент и передаёт установку с вращающимся электродвигателем студенту, осуществляющему измерение параметров первой точки экспериментальной кривой.**

**Снимаем данные и заполняем ячейки таблицы**

Каждый из ответственных за точку зависимости, заносит показания в таблицу, проводит расчёты, и результаты также заносит в таблицу. Все остальные студенты переносят эти данные в тетради.

## **Строим график экспериментальной зависимости**

Старший по работе на доске, а все остальные студенты у себя в тетрадях, заготавливают оси координат. Каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске. Старший на доске, а все остальные студенты у себя в тетрадях проводят аппроксимирующую линию.

Продолжаем полученную прямую до пересечения с осью координат и определяем напряжение трогания.

**Оцениваем, насколько близко опытные данные согласуются с теоретическими данными**

### **2.3 Лабораторная работа №3 (4 часа).**

**Тема:** «Изучение схемы управления асинхронным электродвигателем с переключением со «звезды» на «треугольник»

**2.3.1 Цель работы:** Изучить схему управления электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия пневматического реле времени, научиться производить сборку схемы, убедиться в эффективности функционирования схемы.

**2.3.2 Задачи работы:** Собрать схему управления электродвигателем и испытать её в лабораторных условиях.

**2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории.

#### **2.3.4 Описание (ход) работы:**

Переключение электродвигателя со звезды на треугольник производится, во-первых, при запуске электродвигателя с целью разгрузки маломощной электрической сети от повышенного пускового тока. При этом напряжение на обмотках при соединении их «звездой» по сравнению с соединением «треугольником» снижается в  $\sqrt{3}$  раз, во столько же раз снижается и фазный пусковой ток. Линейный же ток, что особенно важно для стабильности напряжения в питающей сети, снижается в три раза. К сожалению, поскольку момент пропорционален квадрату напряжения, в три раза снижается и пусковой момент. Поэтому данный способ запуска применим только для рабочих машин с малым моментом трогания.

Во-вторых, обратное переключение электродвигателя с треугольника на звезду производится с целью повышения коэффициента мощности при малой (не превышающей 30%) степени загрузки электродвигателя. В этом случае, хотя момент электродвигателя и снижается в три раза, но его оказывается достаточно для преодоления пониженного (при недогрузке) момента сопротивления рабочей машины.

Ниже приведена схема для управления электродвигателем с возможностью переключения со звезды на треугольник или наоборот. Она состоит из реверсивного магнитного пускателя КМ1-КМ2, переключателя режима работы SA1, трёхкнопочного поста управления SB1...SB3 и приборов для контроля параметров электродвигателя. В схеме задействовано пневматическое реле времени KT1. Ниже приведен эскиз, раскрывающий устройство и принцип действия реле.

Оно состоит из катушки 1 медного изолированного провода, намотанной на неподвижный сердечник 2, взаимодействующий с подвижным сердечником 3. Сердечник механически связан с контактами 4 и 5 и через пружину 6 с контактами 7, 8 и мембраной 9, перекрывающей замкнутую полость 10. Полость связана с атмосферой через отверстие малого диаметра 11 и клапан 12.

При подаче напряжения на катушку (входной сигнал) подвижный сердечник притягивается к неподвижному и через механическую связь без выдержки времени замыкает контакты KT1.2 и размыкает контакты KT1.3. Одновременно под действием пружины по мере заполнения воздухом полости 10 через отверстие 11 начинается

перемещение мембранны 9. Когда она переместится на достаточное расстояние, замкнутся контакты КТ1.4 и одновременно разомкнутся контакты КТ1.5. Возврат этих контактов при снятии напряжения с катушки осуществляется без задержки времени, так как воздух из полости выходит через клапан 12 свободно и не препятствует перемещению мембранны.

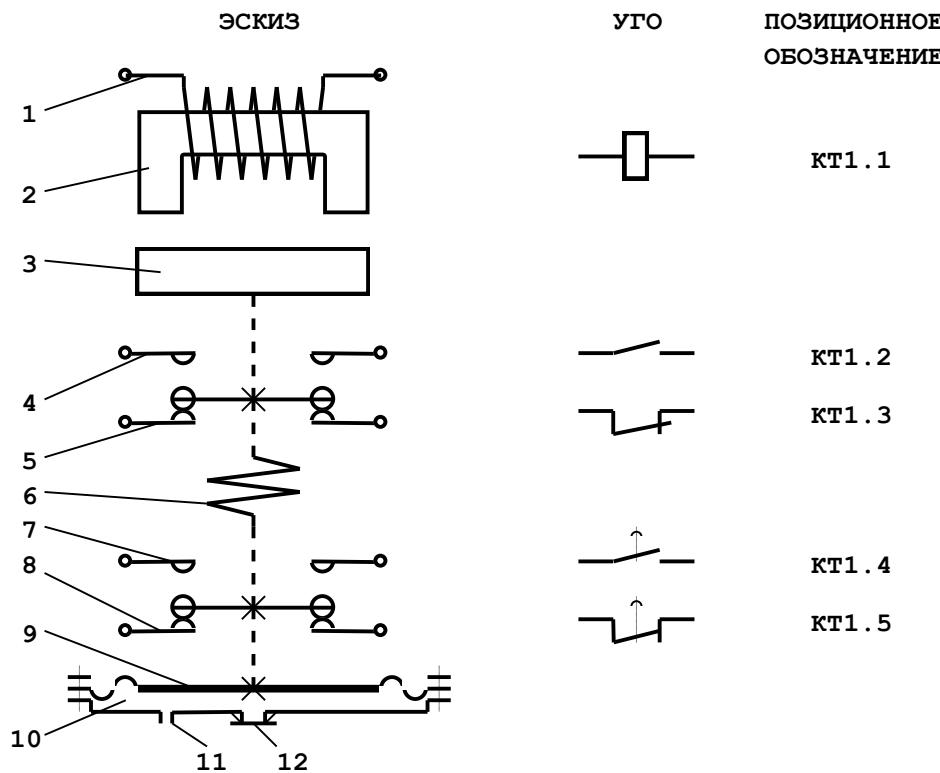


Рис. 1: Схема устройства реле времени.

**Дополнительная литература - Лекция по теме: «Механические характеристики и регулирование частоты вращения асинхронного электродвигателя».**

Порядок выполнения задания

#### Технические данные оборудования:

Старший по работе заготавливает таблицу на доске и распределяет задания. Ответственные за работу заносят технические данные в таблицу на доске, а все остальные студенты в свои тетради.

#### Схема управления электродвигателем

Схема изображена на плакате и рис. 2. Работает она следующим образом.

С помощью автоматического выключателя QF1 напряжение подаётся на обмотки электродвигателя и схему управления. Однако ток через обмотки электродвигателя, обмотки магнитных пускателей и реле времени не течёт поскольку разомкнуты силовые контакты КМ1.1 и КМ2.1 магнитных пускателей, а также блокировочные контакты КМ1.3, КМ2.3. Разомкнуты также контакты SB1.2, SB2.2 кнопок и контакты КТ1.2, КТ1.4 реле времени КТ1. Если переключатель SA1 находится в положении «РУЧНОЙ», то обмотка КТ1.1 реле времени КТ1 запитана быть не может и реле времени на работу схемы влияния не оказывает. В этом случае переключение со звезды на треугольник и наоборот осуществляется оператором.

При нажатии на кнопку SB1 «ЗВЕЗДА» размыкается контакт SB1.1 предотвращая включение катушки КМ2.2 магнитного пускателя КМ2 и замыкается контакт SB1.2. Начинает протекать ток по цепи: фаза С сети – катушка КМ1.2, размыкающий контакт с

выдержкой времени при размыкании **КТ1.5** реле времени КТ1 – разымающий контакт **KM2.4** магнитного пускателя KM2 – разымающий контакт **SB2.1** кнопки SB2 – замыкающий контакт **SB1.2** кнопки SB1 – разымающий контакт кнопки **SB3 – фаза Асети**. Магнитный пускатель KM1 срабатывает. Замыкаются его силовые контакты KM1.1, запитывающие обмотки электродвигателя M1 по схеме «звезда», размыкается контакт KM1.4, предотвращая включение катушки KM2.2, и замыкается контакт KM1.3, резервируя цепь питания катушки KM1.2 на случай, когда контакты SB1.1 при отпускании кнопки SB1 разомкнутся.

Электродвигатель будет работать по схеме «звезда» до тех пор, пока не будет нажата кнопка SB2 «ТРЕУГОЛЬНИК». В этом случае замкнутся контакты SB2.2, подготавливая цепь питания катушки KM2.2, и разомкнутся контакты SB2.1. Катушка KM1.2 потеряет питание, магнитный пускатель KM1 разомкнёт свои силовые контакты KM1.1 (электродвигатель на мгновение обесточится) разомкнёт блокировочные контакты KM1.3, разблокировав контакты SB1.2, и замкнёт контакты KM1.4. При этом запитается катушка KM2.2 магнитного пускателя KM2 по цепи: фаза **C** – катушка **KM2.2** – контакты **KM1.4** магнитного пускателя KM1 – контакты **SB1.1** – контакты **SB2.2** нажатой кнопки SB2 – кнопка **SB3 – фаза А**. Магнитный пускатель KM2 сработает: замкнёт свои силовые контакты KM2.1, переключив обмотки ещё вращающегося по инерции электродвигателя M1 в треугольник; заблокирует контактами KM2.3 замыкающие контакты SB2.2 на случай отпускания кнопки SB2; разомкнёт контакты KM2.4, предотвращая возможность одновременного срабатывания обоих пускателей.

Отключение электродвигателя, независимо от того работает он в «звезды» или в «треугольник» осуществляется путём нажатия на кнопку SB3. При размыкании контакта этой кнопки теряет питание или катушка KM1.2, или катушка KM2.2 – электродвигатель отключается. При этом отпускание кнопки SB3 не приводит к повторному включению пускателей поскольку успевают разомкнуться блокировочные контакты KM1.3 или KM2.3 (в зависимости от того какой пускатель был включён)

Если же переключатель SA1 находится в положении «АВТОМАТИЧЕСКИЙ», подготовлена цепь питания катушки KT1.1 реле времени. В этом случае при нажатии на кнопку SB1 электродвигатель запускается в звезду, как и в предыдущем случае, но одновременно с включением катушки магнитного пускателя KM1 запитывается катушка KT1.1 реле времени KT1 по цепи: фаза **C** – катушка **KT1.1** реле времени KT1 – контакт **1-3** переключателя SA1 – контакт кнопки **SB3 – фаза А** сети. Реле KT1 сработает и своими замыкающими контактами KT1.2 дополнительно заблокирует замыкающий контакт SB1.2 с тем, чтобы катушка реле не потеряла питание ни при отпускании кнопки SB1, ни при отключении магнитного пускателя KM1. Через несколько секунд после того как электродвигатель развернется, разомкнётся контакт с выдержкой времени при размыкании KT1.5. Катушка KM1.2 магнитного пускателя KM1 потеряет питание. Электродвигатель отключится, но одновременно с этим через замкнувшиеся теперь контакты KM1.4 будет подано напряжение на обмотку KM2.2 магнитного пускателя KM2 по цепи: фаза **C** – катушка **KM2.2** – контакты **KM1.4** магнитного пускателя KM1 – контакты **SB1.1** – контакты **KT1.4** реле времени KT1 – кнопка **SB3 – фаза А**. Магнитный пускатель KM2 сработает: замкнёт свои силовые контакты KM2.1, переключив обмотки ещё вращающегося по инерции электродвигателя M1 в треугольник; заблокирует контактами KM2.3 замыкающие контакты SB2.2, разомкнёт контакты KM2.4, предотвращая возможность одновременного срабатывания обоих пускателей.

Таким образом, в автоматическом режиме оператору не нужно отслеживать окончание запуска электродвигателя на соединении в «звезду» и не нужно нажимать кнопку SB2 для перевода электродвигателя на «треугольник». Эти функции взято на себя реле времени. Отключение электродвигателя, как и в ручном режиме, осуществляется нажатием на кнопку SB3.

Соберём электрическую схему.

Сидоров – собирает узел 1; Козлов – узел 2 и так далее.

Расположение выводов элементов реле времени на панели соответствует расположению выводов на эскизе реле (рис.1). Одновременно схема перечерчивается всеми студентами в тетради.

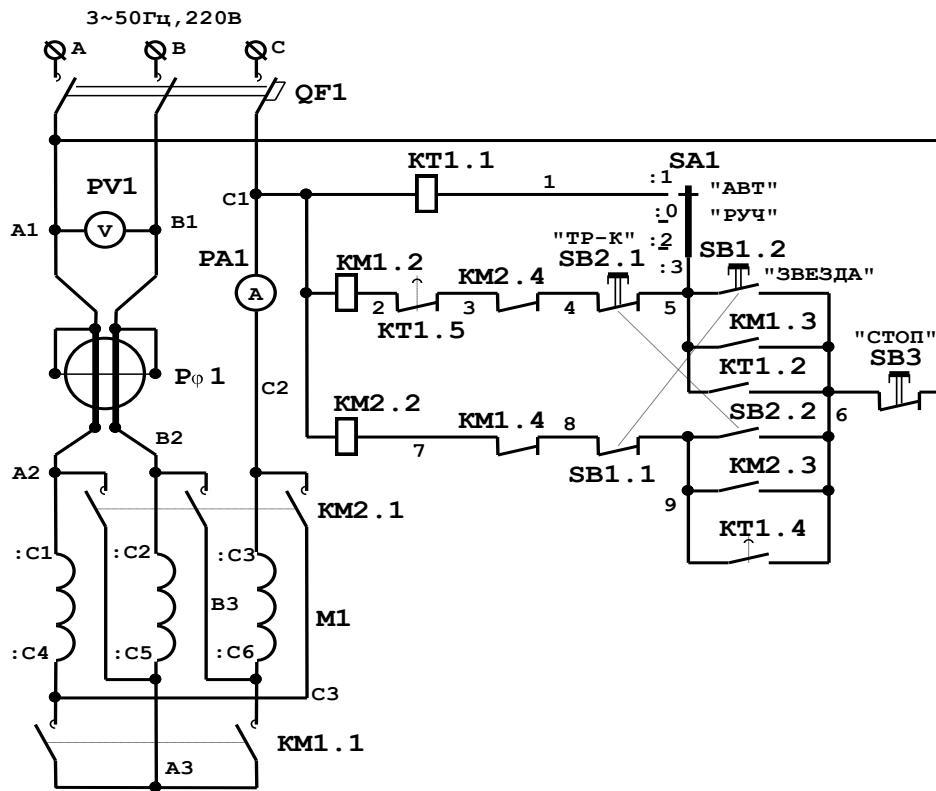


Рис.2: Принципиальная схема управления асинхронным электродвигателем с переключением со звезды на треугольник

#### Таблица записи наблюдений

Старший по работе заготавливает таблицу на доске, распределяются задания.

#### Данные опытов и расчётов

#### Таблица 2

Исполнитель	Схема соединения	Опытные данные			Расчётные данные	
		U, В	I, А	Cosφ	S <sub>1</sub> , ВА	P <sub>1</sub> , Вт
Сидоров	«Звезда»					
Козлов	«Треугольник»					

#### 4.4 Осуществим испытание схемы

1. Устанавливаем SA1 в положение «РУЧ» объясняем, что произойдёт в схеме при включении QF1, подаём напряжение и убеждаем всех присутствующих в истинности им провозглашённого.

2. Объясняем, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB1; убеждаем присутствующих в достоверности сказанного. Снимаем и записываем показания приборов в таблицу на доске.

3. Объясняем, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки SB2; убеждаем присутствующих в достоверности сказанного. Снимаем и записываем показания приборов в таблицу на доске.

## 2.4 Лабораторная работа №4 (4 часа).

**Тема:** «Схема реверсивного управления асинхронным электродвигателем с торможением противовключением»

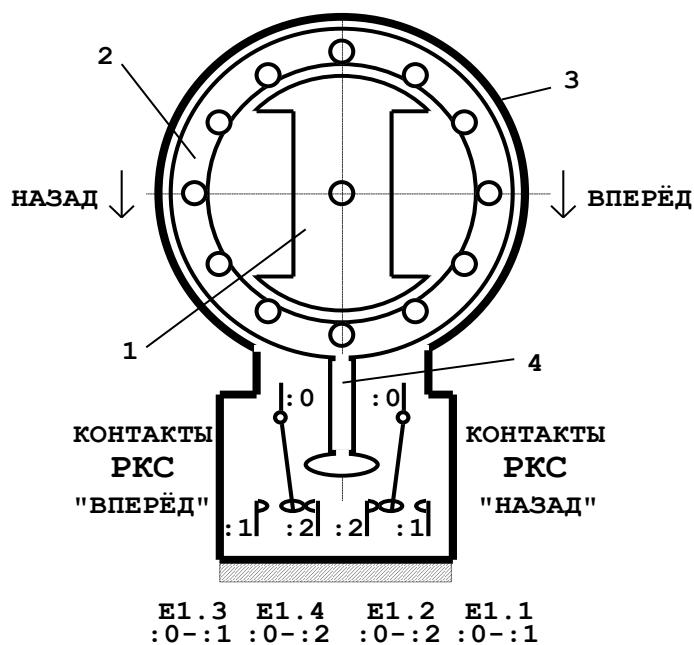
**2.4.1 Цель работы:** Изучить схему реверсивного управления 3-х фазным асинхронным электродвигателем с помощью магнитного пускателя, устройство и принцип действия реле контроля скорости, научиться производить сборку схемы, убедиться в эффективности функционирования схемы.

**2.4.2 Задачи работы:** Собрать схему управления электродвигателем и испытать её в лабораторных условиях.

**2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**  
универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории

### 2.4.4 Описание (ход) работы:

На практике часто применяется способ быстрой остановки электродвигателя путем переключения электродвигателя на ходу на обратное вращение. После переключения электродвигателя магнитное поле начинает вращаться в обратном направлении, а ротор продолжает по инерции вращаться, быстро снижая частоту вращения до нуля. В этот момент напряжение с клемм электродвигателя нужно снять, иначе электродвигатель начнет вращение в обратном направлении. Вручную этот момент зафиксировать не удается, поэтому применяют специальное реле контроля скорости (РКС).



**Рис.1: Схема устройства реле контроля скорости.**

Реле состоит из постоянного магнита 1, вращающегося вокруг оси и соединенного с валом электродвигателя. Постоянный магнит помещен в цилиндр 2, представляющий собой устройство в виде беличьей клетки. Цилиндр укреплен на подшипниках в корпусе 3 и может поворачиваться на определенный угол до упора, при этом рычагом 4 переключаются контакты.

Если ротор электродвигателя вращается вперед вместе с ним вращается и электромагнит 1, который своим магнитным полем увлекает за собой цилиндр 2 и он поворачивается в сторону вращения, переключая контакты E1.3 и E1.4. При вращении ротора в обратном направлении переключаются контакты E1.1 и E1.2.

Схема управления электродвигателя с применением РКС приведена на плакате и рис. 2.

Работает схема следующим образом. При подаче напряжения на схему с помощью автоматического выключателя QFI ток в цепи не протекает, так как разомкнуты контакты KM1.3 и KM2.3, E1.1 и E1.3, SB1 и SB2. Нажимаем кнопку SB1. Начинает протекать ток по цепи: фаза С, катушка KM1.1, контакты KM2.4, E1.2, SB1, SB3, фаза А. Срабатывает магнитный пускатель KM1, включает электродвигатель M1 на вращение “вперед”, блокирует кнопку SB1 и размыкает цепь питания катушки KM2.1, чем предотвращается одновременное включение магнитных пускателей. Как только электродвигатель начал вращаться вперед, контакты РКС E1.4 размыкаются, а E1.3 замыкаются.

Нажимаем кнопку SB3. Отключается магнитный пускатель KM1. Как только его контакт KM1.4 замыкается, получает питание катушка KM2.1 по цепи: фаза С-KM2.1-KM1.4-E1.3-фаза А. Магнитный пускатель KM2 срабатывает, включает электродвигатель на обратное вращение, что приводит к резкому торможению ротора. Когда частота вращения станет равной нулю, контакты РКС E1.3 разомкнутся пускатель KM2 отключится, отключив электродвигатель. Через мгновение замкнутся контакты E1.4, но ток через катушку KM2.1 уже не пойдет, так как успели разомкнуться контакты KM2.3.

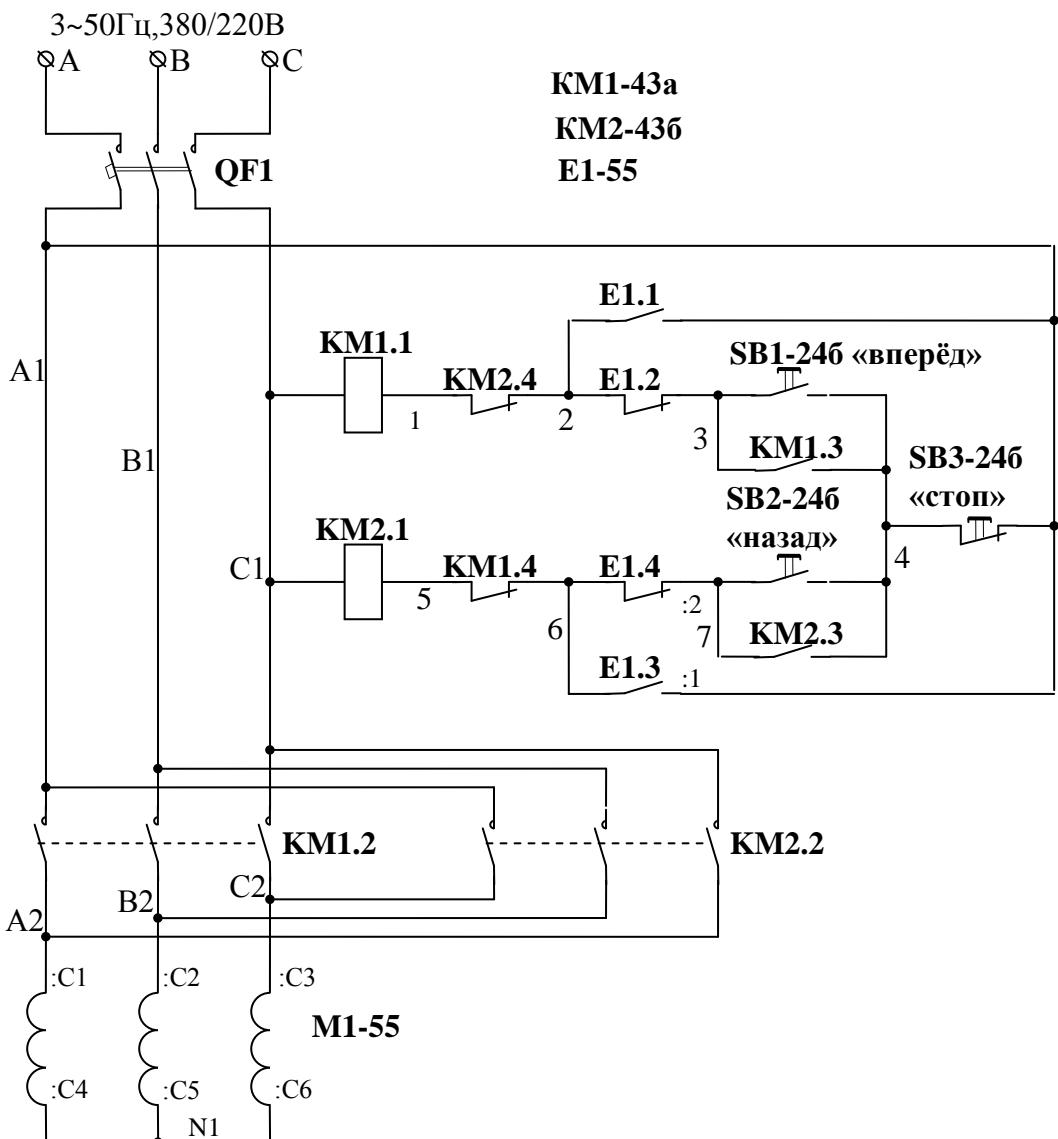
Аналогично работает схема и при нажатии кнопки SB2 «назад».

### **Знакомимся с основными техническими данными и расположением оборудования**

Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии

#### **Собираем электрическую схему:**

Сидоров – собирает узел 1; Козлов – узел 2 и так далее. Во время сборки схема перечерчивается в тетради.



**Рис. 2: Схема управления электродвигателем.**

### Осуществляем испытание схемы

- Сидоров – объясняет, что произойдёт в схеме при включении **QF1**. подаёт напряжение и убеждает всех присутствующих в истинности им провозглашённого.
- Козлов – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки **SB1** и показывает работу схемы при данном воздействии.
- Скворцов – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки **SB2**, демонстрирует сказанное.
- Сорокин – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки **SB3**, демонстрирует сказанное
- Воронин – объясняет, что произойдёт в схеме после нажатия кнопки **SB2**, демонстрирует сказанное.
- Эйлер - демонстрирует работу схемы после нажатия кнопки **SB3**, предварительно объяснив ожидаемую реакцию схемы.

Подготовить ответы на вопросы, сдать на проверку преподавателю отчёт и ответить на один из вопросов по выбору преподавателя

## 2.5 Лабораторная работа №5 (4 часа).

**Тема:** «Исследование центробежного вентилятора»

**2.5.1 Цель работы:** Ознакомиться с устройством и принципом действия центробежного вентилятора, научиться снимать и строить характеристики вентилятора.

**2.5.2 Задачи работы:** Снять зависимость мощности на валу вентилятора  $P_B$ ,

момента на валу вентилятора  $M_B$ , напора  $H$ , расхода  $Q$  и коэффициента полезного

действия вентилятора  $\eta_B$  от частоты вращения  $M_B, H, Q, \eta_B = f(\omega)$ , а также

мощности вентилятора  $P_B$  от расхода  $P_B = f(Q)$ .

**2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории.

**2.5.4 Описание (ход) работы:**

Центробежный вентилятор совершают работу по перемещению воздушной массы. Эта работа идёт на увеличение кинетической энергии потока воздуха. Если через поперечное сечение  $S$  нагнетающего трубопровода вентилятора перемещается воздух со скоростью  $v$ , то расход  $Q$  воздуха, равный объёму воздуха, прошедшего через поперечное сечение трубопровода за одну секунду,

$$Q = S v \quad (\text{м}^3/\text{с}), \quad (1)$$

а масса

$$m = Q \rho = S v \rho \quad (\text{кг}/\text{с}), \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность воздуха, равная  $1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Так как до входа во всасывающий патрубок вентилятора скорость воздуха была равна нулю, а на выходе  $v$ , то следовательно, прошёлшей массе воздуха было сообщено  $W_k$  джоулей кинетической энергии, равное в данном случае (время равно 1 секунде) мощности передачи энергии

$$P = \frac{m v^2}{2} = \frac{S v \rho v^2}{2} = Q \frac{\rho v^2}{2} \quad (\text{Вт}). \quad (3)$$

С другой стороны, если в потоке воздуха выделить сечение  $S$  (Смотри рис. 1), то эта мощность по преодолению сил инерции потока воздуха будет равна произведению скорости перемещения сечения на силу, приложенную к сечению

$$P = v F_{\text{дин}} = v S H_{\text{дин}} = Q H_{\text{дин}}, \quad (4)$$

где  $H_{\text{дин}}$  - динамический напор, Па.

Сравнивая (3) и (4), получим уравнение для определения динамического (скоростного) напора

$$H_{\text{дин}} = \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

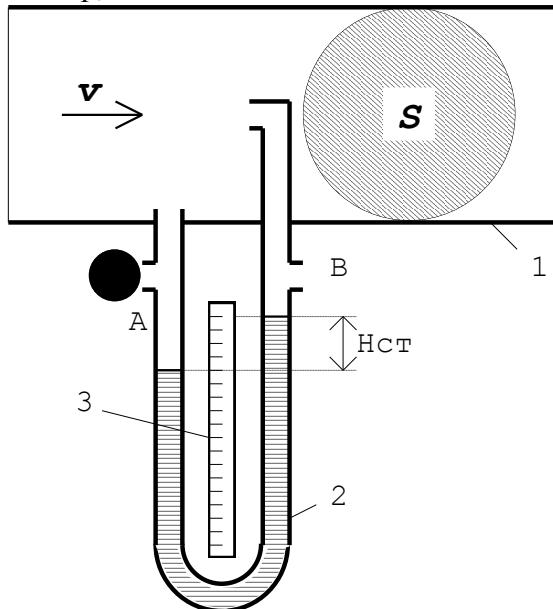
Его можно измерить с помощью трубы Пито, изображённой на рисунке 1, и по его величине подсчитать скорость воздушного потока

$$v = \sqrt{\frac{2H_{\text{дин}}}{\rho}}, \quad (6)$$

подсчитать расход по выражению (1) и мощность по выражению (4). Однако следует иметь в виду, что мощность расходуется не только на сообщение кинетической энергии потоку, но и на преодоление потерь напора в напорном трубопроводе. Поэтому в уравнении (4) вместо динамического напора необходимо подставлять полный напор

$$P = Q H = Q H_{\text{дин}} + H_{\text{ст}}, \quad (7)$$

где  $H_{\text{ст}}$  – статический напор, Па.



**Рис. 1: Схема измерения напоров.** (1-трубопровод, 2- трубка Пито, 3- мерная линейка, А и В - отверстия для рассоединения концов трубки)

Если закрыть пальцами отверстия А и В одновременно, то разность уровней в трубках покажет динамический напор в мм водяного столба (1 мм водяного столба равен 9,8 Па). При закрытом отверстии А (как показано на рисунке) измеряется статический напор, а при закрытом отверстии В – полный. При этом, если повышение уровня происходит в сторону открытого отверстия, то напор положителен, а в сторону закрытого – отрицателен.

#### Задание

Снять зависимость мощности на валу вентилятора  $P_B$ , момента на валу вентилятора  $M_B$ , напора  $H$ , расхода  $Q$  и коэффициента полезного действия вентилятора  $\eta_B$  от частоты вращения  $M_B, H, Q, \eta_B = f(\omega)$ , а также мощности вентилятора  $P_B$  от расхода  $P_B = f(Q)$ .

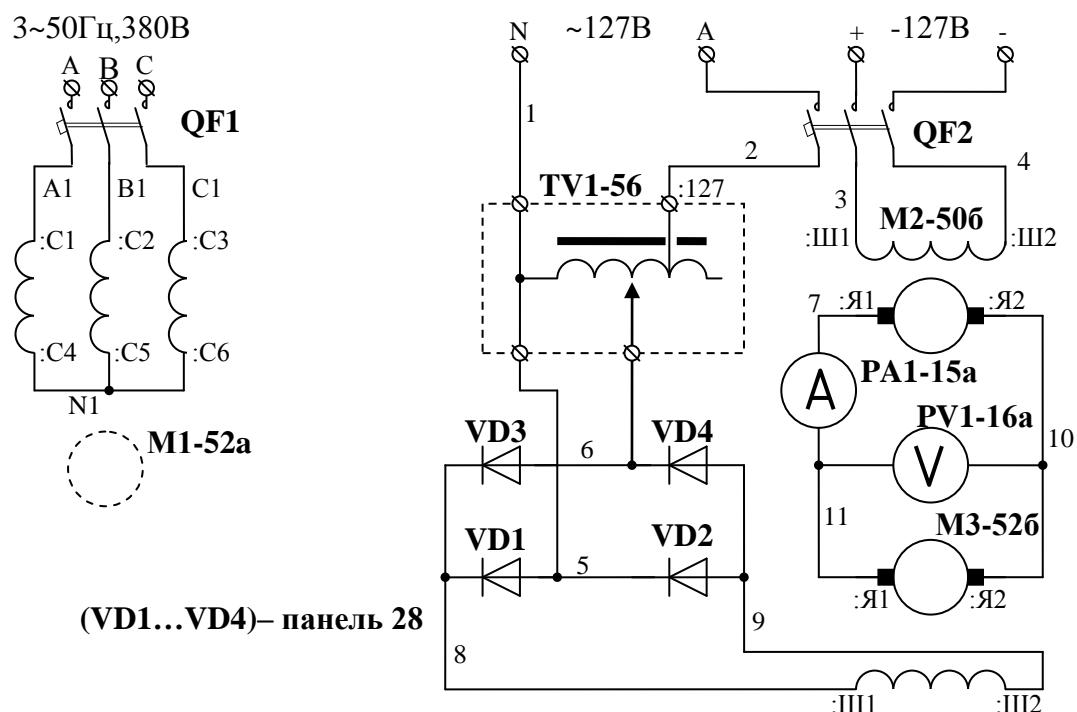
#### Порядок выполнения задания

**Знакомимся с составом и основными техническими данными электрооборудования, используемого в лабораторной работе**

Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии

#### Собираем электрическую схему:

Сидоров – узел 1; Козлов – узел 2 и так далее. Во время сборки перечертить схему в тетради.



**Рис. 2: Принципиальная схема установки для испытания вентилятора.**

**Заготавливаем таблицу записи наблюдений:**

**Данные опытов и расчётов**

**Таблица 1**

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>О пы т ны е д а н ны е</b>											
Сечение, %	100	100	100	100	100	100	100	75	50	25	0
U, В	70	90	110	130	150	165	180	180	180	180	180
I, А											
n, об/мин											
M <sub>ш</sub> , мм											
H <sub>дин</sub> , мм в. ст.											
H <sub>ст</sub> , мм в. ст.											
H, мм в. ст.											
<b>Расч ётн ы е д а нн ы е</b>											
$\omega = \pi n / 30$ , 1/c											
M, Нм											
H <sub>дин</sub> , Па											
H <sub>ст</sub> , Па											
H, Па											
v, м/с											
Q, м <sup>3</sup> /с											
P <sub>1</sub> = UI, Вт											
P <sub>2</sub> = P <sub>В</sub> = M <sub>ω</sub> , Вт											
P <sub>ВП</sub> = QH, Вт											
$\eta_{\text{д}} = P_2 / P_1$											
$\eta_{\text{в}} = P_{\text{ВП}} / P_2$											
$\eta_{\text{бв}} = \eta_{\text{д}} \eta_{\text{в}}$											

**Записываем действия при определении параметров точки экспериментальной зависимости, заданной третьей и четвёртой строками таблицы 2:**

- a). Устанавливаем заданное напряжение и сечение трубопровода;
- b). Измеряем тахометром скорость вращения вала электродвигателя в оборотах в минуту, момент в мм шкалы, ток якоря электродвигателя I в амперах и напоры в мм водяного столба;
- v). Рассчитываем и заносим в таблицу на доске: частоту вращения, момент  $\{M=15,8\sin(M_{ш}/135)\}$  и напоры в Паскалях. Кроме того, по вышеприведённым формулам находим скорость воздуха, расход, мощности и коэффициенты полезного действия.

**Измеряем диаметр и рассчитаем сечение напорного трубопровода ( $D=?$   $S=\pi D^2/4$ )**

Работу выполняет очередной студент.

Старший распределяет точки экспериментальной зависимости по исполнителям и записывает фамилии исполнителей в строку таблицы

**Осуществляем запуск электродвигателя в следующей последовательности:**

A) Устанавливаем движок автотрансформатора TV1 в нулевое положение (против часовой стрелки до упора, что соответствует левому положению движка автотрансформатора на схеме).

B) С помощью QF1 подаём напряжение 380 В на зажимы асинхронного электродвигателя. Проверяем направление вращения электродвигателя. Если оно не по стрелке, меняем фазировку напряжения на зажимах электродвигателя.

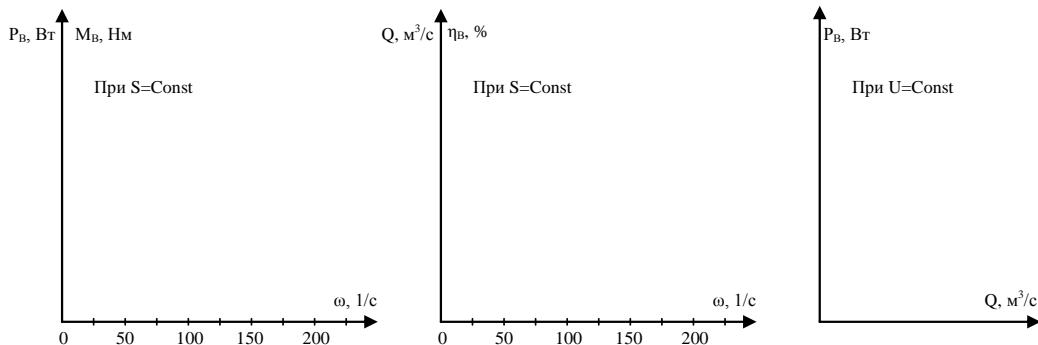
C) С помощью QF2 подаём напряжение 127 вольт на вход автотрансформатора и выпрямленное напряжение 127 вольт на обмотку возбуждения электродвигателя M3. Так как напряжение на выходе автотрансформатора равно нулю, равно нулю и напряжение на обмотке возбуждения генератора M2. Следовательно, на выходных зажимах якоря генератора M2 напряжение, подаваемое и на якорь электродвигателя M3, также равно нулю и электродвигатель не вращается.

D) Медленно увеличиваем напряжение на выходе автотрансформатора, следя за тем, чтобы электродвигатель начал вращаться (неподвижность якоря при напряжении 10 и более вольт может свидетельствовать об аварийном режиме: отсутствии тока в обмотке возбуждения; замыкании или обрыве цепи якоря).

Д) Доводим напряжение до 30...50 вольт.

Работу выполняет очередной студент и передаёт установку с вращающимся электродвигателем студенту, осуществляющему измерение параметров первой точки экспериментальной зависимости.

**По опытным и расчётным данным строим графики**



**Рис. 3: Графики искомых зависимостей**

Старший по работе заготовляет оси координат на доске, все остальные студенты в тетрадях.

Нанести каждую точку зависимости на поле графика

(кроме того, каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске)

4.7.2. Провести на графике аппроксимирующие линии

(ведущий это делает на доске)

4.8. Оцениваем, насколько близко опытные данные согласуются с теоретическими данными.

## 2.6 Лабораторная работа №6 (4 часа).

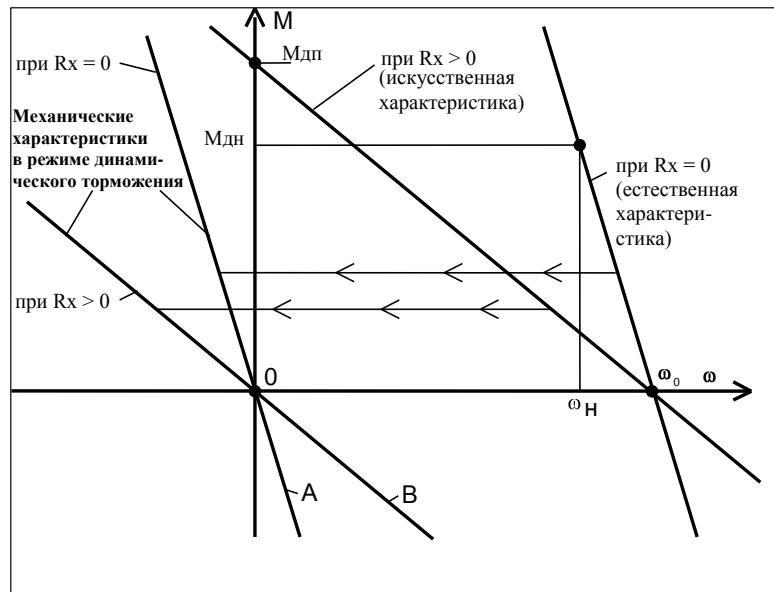
**Тема:** «Исследование механической характеристики шунтового электродвигателя в режиме динамического торможения»

**2.6.1 Цель работы:** Научиться осуществлять перевод электродвигателя в режим динамического торможения, снимать и строить механические характеристики в этом режиме.

**2.6.2 Задачи работы:** Построить график зависимости электродвижущей силы от частоты вращения  $E = f(\omega)$  и механическую характеристику электродвигателя  $M = f(\omega)$  в режиме динамического торможения. (Согласно теоретическим положениям, изложенным выше, ожидаемый вид характеристик – прямая линия, проходящая через начало координат).

**2.6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**  
универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории

**2.6.4 Описание (ход) работы:** Для перевода в режим динамического торможения якорь электродвигателя отключается от сети постоянного тока и замыкается на сопротивление  $R_x$  или накоротко. Напряжение на обмотке возбуждения, а следовательно, и магнитный поток остаются неизменными.



**Рис. 1: Механические характеристики шунтового электродвигателя в режиме динамического торможения.**

$$\omega_0 = \frac{U}{k \Phi}$$

В результате частота идеального холостого хода станет равной нулю, а наклон характеристики, определяемый коэффициентом при втором члене

$$\omega = \frac{U}{k \Phi} - \frac{R_y + R_x}{\Phi^2} M$$

механической характеристики , останется неизменным.

Таким образом, характеристика, не изменяя наклона, переместится параллельно самой себе, как показано на рисунке, в начало координат и будет описываться уравнением прямой линии, проходящей через начало координат

$$\omega = - \frac{R_y + R_x}{\Phi^2} M \quad . \quad (1)$$

Две такие характеристики А и В (для  $R_x = 0$  и для  $R_x$  отличном от нуля) приведены на рисунке 1.

### **Порядок выполнения задания**

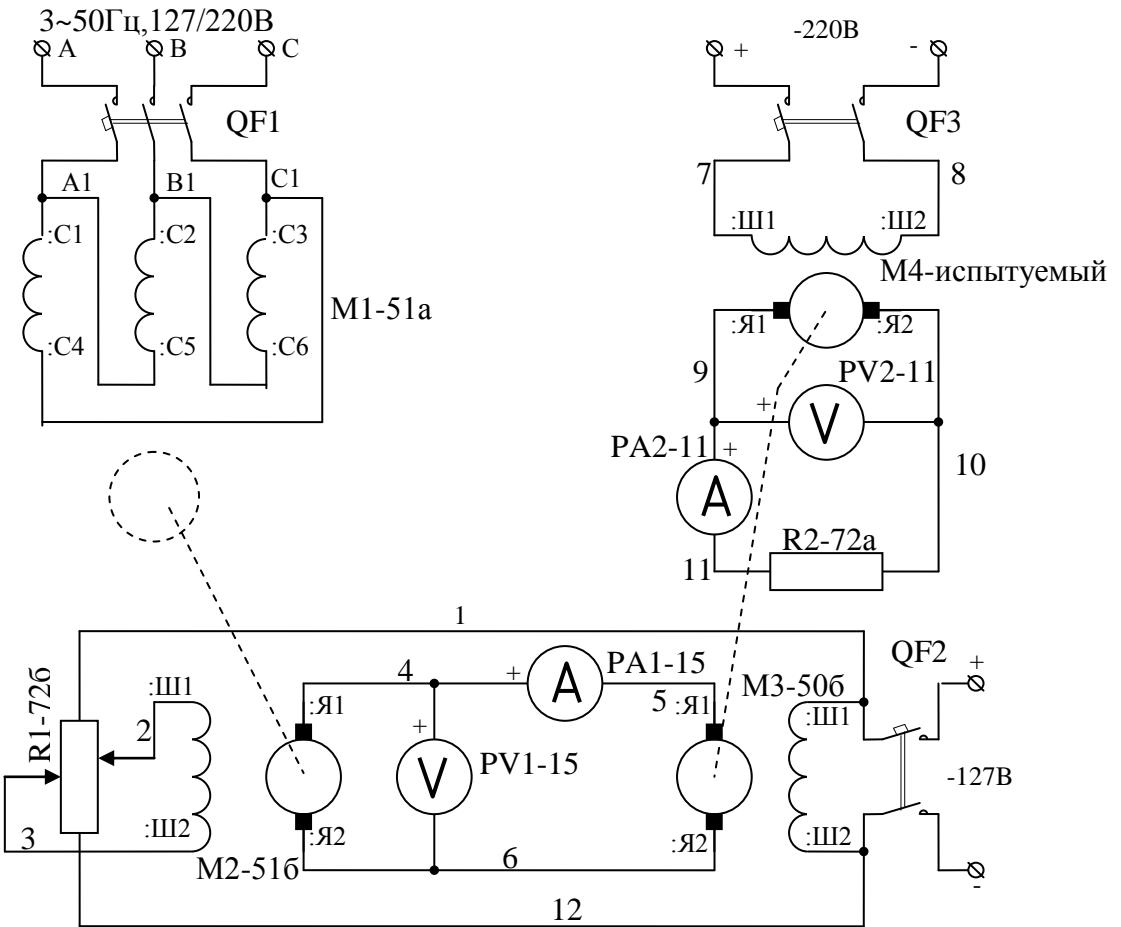
**Знакомимся с основными техническими данными используемого в экспериментальной установке оборудования и его размещением на стенде**

Знакомство осуществить по перечню элементов универсального лабораторного стенда, составленному на вводном занятии

### **Описываем и собираем схему экспериментальной установки**

Схема изображена на рис. 2. Якорь испытуемого электродвигателя М4 замкнут через амперметр РА2 на резистор R2. На обмотку возбуждения подано постоянное напряжение 220 В. Электродвигатель в режиме торможения приводится во вращение электродвигателем постоянного тока параллельного возбуждения М3 (балансирная машина). Двигатель способен за счёт изменения напряжения на его якоре изменять частоту вращения, как в прямом, так и в обратном направлениях. Регулируемое напряжение на якорь этого электродвигателя подаётся от мотор-генераторной установки (асинхронный электродвигатель М1 – генератор постоянного тока с независимым возбуждением М2). Электродвигатель М1 вращает якорь генератора М2 с постоянной скоростью, а напряжение на выходе генератора изменяется за счёт изменения напряжения на его обмотке возбуждения с помощью двух движкового потенциометра R1.

Если левый движок потенциометра располагается выше правого, то на клемме Ш1 минус, а на клемме Ш2 плюс и наоборот, если левый движок ниже правого, то минус на клемме Ш2, а плюс на клемме Ш1. Напряжение снимается с участка потенциометра, расположенного между движками. Поэтому чем больше раздвинуты движки, тем выше напряжение. Таким образом, изменяется полярность и величина напряжения на якоре генератора М2 и на якоре М3, а следовательно, направление и величина частоты вращения электродвигателя М3 и испытуемого электродвигателя М4.



**Рис. 2: Принципиальная схема установки для снятия механической характеристики шунтового электродвигателя в режиме динамического торможения.**

Собрать электрическую схему. Сидоров собирает узел А1; Козлов – узел А2 и так далее.

#### Записываем порядок запуска установки

- Подаём напряжение на обмотки возбуждения машин постоянного тока с помощью автоматических выключателей QF2 и QF3.
- Устанавливаем напряжение на обмотке возбуждения генератора M2 равным нулю для чего движки потенциометра R1 располагаем напротив друг друга.
- С помощью QF1 запускаем асинхронный электродвигатель M1.
- Плавно раздвигая движки потенциометра R1, убеждаемся, что растёт напряжение на выходе якоря генератора M2, а следовательно, и на входе машины M3. Якорь электродвигателя M3, а следовательно, и якорь генератора M4 начинают вращаться. Напряжение и ток на выходе генератора M4 растут.

#### Действия по снятию параметров характеристики

- Устанавливаем заданную для данной точки величину тока  $I_1$ , раздвигая движки потенциометра R1;
- Измеряем и заносим в таблицу на доске с учётом знака ток  $I_2$ , напряжения  $U_1$  и  $U_2$ , количество делений шкалы, на которое отклонилась стрелка указателя момента  $M_{\text{ш}}$ , и число оборотов вала электродвигателя в минуту.

#### Действия по расчёту параметров характеристики

- Рассчитываем и заносим в таблицу на доске частоту вращения, момент в ньютонах (в расчётной формуле момента аргумент синуса берётся в радианах), э.д.с. ( $E_4$ ) испытуемого электродвигателя, мощность на его валу  $P_{M4}$ , на зажимах  $P_{\text{Э}4}$  и на нагрев якоря  $\Delta P_{\text{Я}4}$ .
- Проверяем баланс мощностей ( $P_{M4}=P_{\text{Э}4}+\Delta P_{\text{Я}4}$ ). Если равенство не соблюдается, определяем и заносим в таблицу процент расхождения результатов ПР. Среднее значение

мощностей в правой и левой частях уравнения  $(P_{M4}+P_{\vartheta 4}+\Delta P_{я4})/2$  принимаем за истинное, находим абсолютное значение разности  $\Delta B=(P_{M4}-P_{\vartheta 4}-\Delta P_{я4})$  и далее её относительное значение, выраженное в процентах,

$$PR = \frac{\Delta B}{P_{cp}} \cdot 100\% \quad (2)$$

**Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных по снятию реостатной механической характеристики в режиме динамического торможения**

Распределяются исполнители.

**Таблица 1**

Опытные данные									
R <sub>2</sub> , Ом	11,4								
I <sub>1</sub> , А									
U <sub>1</sub> , В									
I <sub>2</sub> , А									
U <sub>2</sub> , В									
Расчётные данные									
M=15,8*Sin(M <sub>ш</sub> /135), Нм									
ω=πn/30, 1/с									
E <sub>4</sub> =U <sub>2</sub> +I <sub>2</sub> R <sub>я4</sub> , В									
P <sub>M4</sub> =Mω, Вт									
P <sub>ϑ4</sub> =I <sub>я4</sub> U <sub>я4</sub> , Вт									
ΔP <sub>4</sub> =I <sup>2</sup> <sub>я4</sub> R <sub>я4</sub> , Вт									
PR, %									

Работу по пунктам 4.3 и 4.4 выполняет студент, снимающий первую точку характеристики. При этом старший по работе, следит, чтобы величина тока не отклонялась от заданного значения, пока студент не снимет показания остальных приборов, контролирует его действия и записывает эти показания в соответствующие ячейки верхней строки таблицы на доске, а все остальные студенты в тетради. Студент, снимающий первую точку характеристики, садится и выполняет действия по пункту 4.5. К работе приступает студент, снимающий следующую точку характеристики. И далее в таком же порядке снимаются все остальные точки характеристики. По окончании опытов установка отключается в порядке обратном описанному выше.

**Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных по снятию естественной механической характеристики в режиме динамического торможения**

**Таблица 2**

Опытные данные									
R <sub>2</sub> , Ом	0								
I <sub>1</sub> , А	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
U <sub>1</sub> , В									
I <sub>2</sub> , А									
U <sub>2</sub> , В									

Расчётные данные									
$M = 15,8 * \sin(\frac{M_{\text{ш}}}{135})$ , Нм									
$\omega = \pi n / 30$ , 1/c									
$E_4 = U_2 + I_2 R_{\text{я4}}$ , В									
$P_{\text{М4}} = M \omega$ , Вт									
$P_{\text{Э4}} = I_2 U_4$ , Вт									
$\Delta P_4 = I^2 R_{\text{я4}}$ , Вт									
ПР, %									

Распределяются исполнители. Реостат R2 замыкается накоротко, и далее выполняются действия в порядке, описанном выше.

#### Строим графики механических характеристик

Старший по работе на доске, а все остальные студенты в тетрадях заготавливают оси координат с учётом, что на поле графика должны быть размещены обе снятые характеристики. Для первой характеристики каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске. Старший по работе на доске, а все остальные студенты в тетрадях проводят аппроксимирующие линии

В таком же порядке строится вторая характеристика.

#### Строим графики зависимости ЭДС от частоты вращения

В том же порядке

#### Оцениваем соответствие опытных и теоретических данных

Сделать заключение, насколько экспериментальные характеристики соответствуют теоретическим предположениям.

### 2.7 Лабораторная работа №7 (4 часа).

**Тема:** «Механические характеристики асинхронного электродвигателя»

**2.7.1 Цель работы:** Научиться производить сборку схемы, осуществлять запуск системы электродвигателей, производить регулирование величины напряжения и нагрузки, устанавливать и измерять параметры режимов работы, снимать и строить механические характеристики.

**2.7.2 Задачи работы:** Снять и построить зависимость момента на валу асинхронного электродвигателя от частоты вращения  $M = f(\omega)$  для различных значений сопротивления в цепи якоря.

**2.7.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории

#### 2.7.4 Описание (ход) работы:

Момент, развиваемый асинхронной машиной  $M = k \Phi I_2 \cos \psi_2$ , ток ротора

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{s E_{21}}{\sqrt{r_2^2 + X_{21}^2}}, \quad \cos \psi_2 = \frac{r_2}{Z_2} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + X_{21}^2}}$$

где  $k$  – конструктивный коэффициент машины;

$\Phi$  – величина вращающегося магнитного потока, Вб;

$s = \omega_c - \omega$  – скольжение ротора относительно магнитного поля статора;

$\omega_c$  - частота вращения магнитного поля (синхронная частота), 1/с;  
 $r_2 = r_p + R_x$  - суммарное сопротивление обмотки ротора и добавочного сопротивления в цепи ротора, Ом;

$E_2$  - ЭДС, наведённая в обмотке ротора при скольжении  $s$ , В;

$E_{21}$  - ЭДС, наведённая в обмотке заторможенного ротора (при  $s=1$ );

$X_2$  и  $X_{21}$  - реактивное сопротивление ротора соответственно при  $s$  и при  $s=1$ ;

$Z_2$  и  $Z_{21}$  - полное сопротивление цепи ротора соответственно при  $s$  и при  $s=1$ ;

$\psi_2$  - угол между векторами наведённой ЭДС и тока в цепи ротора.

Подставив в уравнение момента выражение тока и  $M = f \cdot \cos \psi_2$ , получим уравнение механической характеристики электродвигателя

$$M = k \Phi \frac{s E_{21}}{\sqrt{r_2^2 + X_{21}^2}} \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + X_{21}^2}} = k \Phi \frac{s E_{21} r_2}{r_2^2 + X_{21}^2} = k_1 \frac{s r_2}{r_2^2 + X_{21}^2},$$

(1)

где  $k_1 = k \Phi E_{21}$ .

Анализ уравнения (1) показывает, что при скольжении близком к нулю характеристика прямолинейна, а при скольжении близком к единице – гиперболическая.

При этом максимальный (критический) момент  $M_{max} = M_k = k_1 / 2 X_{21}$  наблюдается при критическом скольжении  $s_k = r_2 / X_{21}$ . Подставив в уравнении (1)  $k_1 = 2 X_{21} M_k$  и  $X_{21} = r_2 / s_k$ , получим уравнение механической характеристики электродвигателя выраженной через каталожные данные (упрощенное уравнение Клосса)

$$M = \frac{2 M_k}{s / s_k + s_k / s}. \quad (2)$$

При этом критическое скольжение находится по формуле

$$s_k = s_h (\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1}), \quad (3)$$

где  $\mu_k = M_k / M_h$  - перегрузочная способность электродвигателя.

Поскольку коэффициент  $k_1$  включает в себя магнитный поток  $\Phi$  и ЭДС  $E_{21}$ , пропорциональные приложенному (сетевому) напряжению, то следовательно момент пропорционален квадрату напряжения  $M \equiv U^2$ .

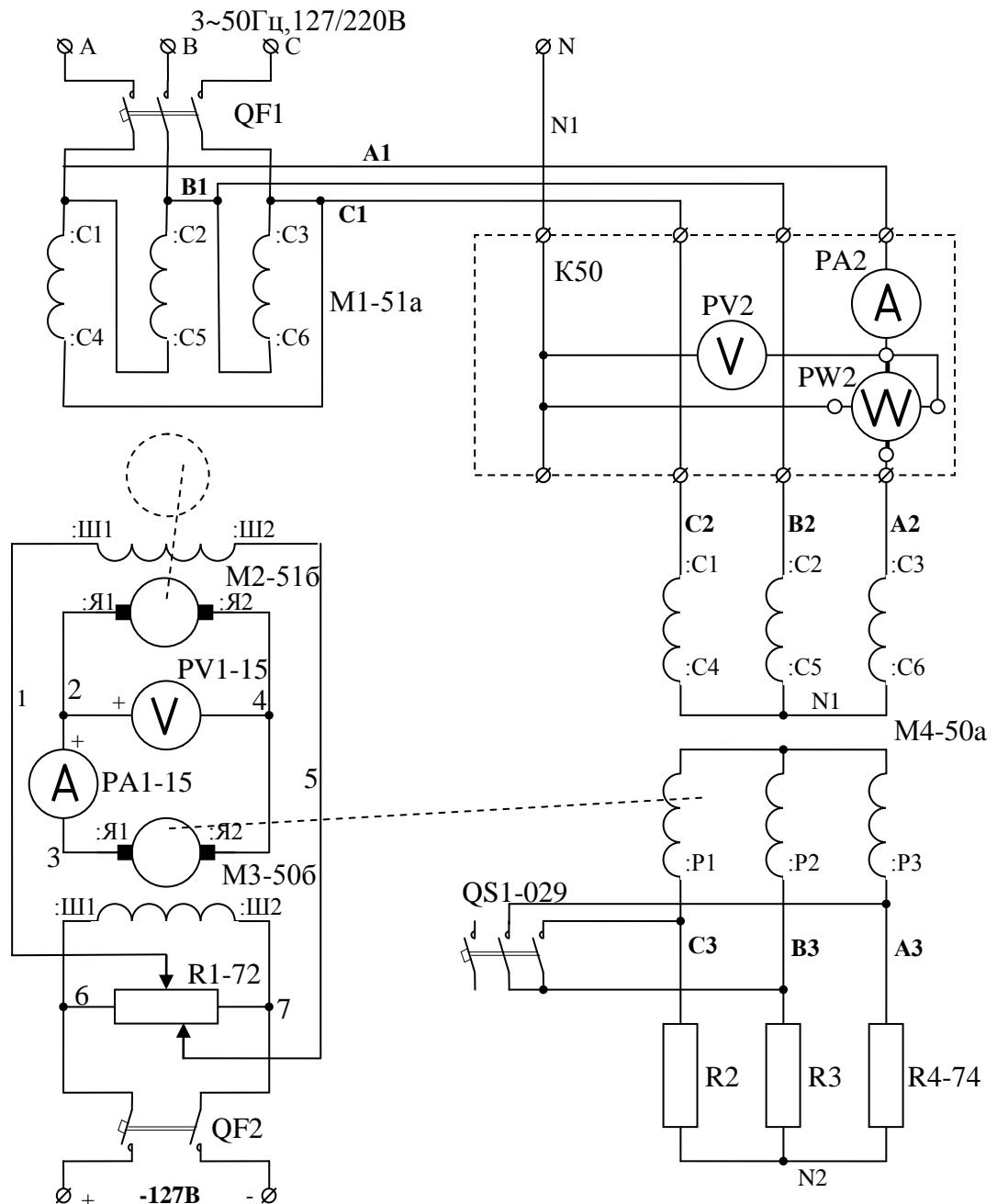
### Порядок выполнения задания

#### Знакомимся с основными техническими данными и расположением оборудования

Знакомство осуществить по перечню элементов, составленному на вводном занятии

#### Собираем схему экспериментальной установки

Соберём электрическую схему по плакату. Сидоров собирает узел А1; Козлов – узел А2 и так далее. Во время сборки перечертим схему в тетради.



**Рис. 1: Принципиальная схема установки для испытания асинхронного электродвигателя.**

**Записываем последовательность запуска установки**

а) Движки потенциометра устанавливаются напротив друг друга, а контакты переключателя QS1 размыкаются. Устанавливаются пределы измерения вольтметра PV2 ( $U_{\Pi 2}=150\text{ В}$ ) и амперметра PA2 ( $I_{\Pi 2}=25\text{ А}$ ), входящих в измерительный комплект K50.

б) Подаётся напряжение на обмотки возбуждения машины постоянного тока посредством автоматического выключателя QF2.

в) Включается автоматический выключатель QF1, тем самым запускается спарка M1-M2.

г) Манипулируя движками потенциометра R1, устанавливается ток  $I_1$  близкий к нулю.

д) С помощью переключателя QS1 устанавливается необходимая, указанная в строке 3 таблицы записи наблюдений, величина добавочного сопротивления  $R_x$  (в данном случае  $R_2$ ) в цепи ротора.

**Записываем действия по снятию параметров характеристики:**

а) Устанавливается заданная для данной точки величина тока  $I_1$ , смещением друг относительно друга движков потенциометра R1;

б) Устанавливается необходимый для конкретной точки (указанный в строке 5) предел измерения по току  $I_{\Pi 2}$ . Рассчитываются цены деления вольтметра PV2 ( $\Pi_{\text{ДРВ2}}=U_{\Pi 2}/150$ ), амперметра PA2 ( $\Pi_{\text{ДРА2}}=I_{\Pi 2}/150$ ) и ваттметра PW1 ( $\Pi_{\text{ДРВ1}}=U_{\Pi 2}I_{\Pi 2}/150$ ).

в) Измеряются и заносятся в таблицу на доске ток  $I_2$ , напряжение  $U_2$  и с учётом знака напряжение  $U_1$ , количество делений шкалы, на которое отклонилась стрелка указателя момента  $M_{\text{Ш}}$ , и число оборотов вала электродвигателя в минуту.

г) Переключатель предела измерения амперметра PA2 устанавливается на 25А.

**Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных при снятии естественной механической характеристики**

Старший по работе вычерчивает таблицу на доске, а все остальные в тетрадях. Распределяются исполнители.

**Таблица 1**

Исполнитель								
<b>Опытные данные</b>								
$R_2=0$								
$I_{\Pi 2}$ , А								
$I_2$ , А								
$P_1$ , Вт								
$M_{\text{Ш}}$ , дел								
$n$ , об/мин								
<b>Расчётные данные</b>								
$\omega=\pi n/30$ , 1/с								
$M=15,8 \cdot \text{Sin}(M_{\text{Ш}}/135)$ , Нм								
$P_B=M\omega$ , Вт								
$P_{\mathcal{E}1}=U_1 I_1$ , Вт								
$P_{\mathcal{E}2}=3P_1$ , Вт								
$\text{Cos}\varphi_2=P_{\mathcal{E}2}/3U_2 I_2$ ,								
$\eta_1=P_B/P_{\mathcal{E}1}$								
$\eta_2=P_{\mathcal{E}2}/P_B$								

Работу выполняет студент, снимающий первую точку зависимости. Его действия контролирует старший по работе, а студент, снимающий следующую точку поддерживает неизменным во время измерений ток  $I_1$ . Затем студент, снимающий первую точку садится, для расчёта и занесения в таблицу на доске расчётных данных. К измерению, выполняя пункты 4.4, приступает следующий студент. И т. д. вплоть до последней точки. Далее одновременно отключаются машины переменного тока, а затем снимается напряжение с обмоток возбуждения машин постоянного тока.

**Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных при снятии реостатной механической характеристики ( $R_2 \neq 0$ )**

**Таблица 3**

Опытные данные								
$R_2$								
$I_{\Pi 2}$ , А								
$I_2$ , А								

P <sub>1</sub> , Вт								
M <sub>ш</sub> , дел								
n, об/мин								
<b>Расчётные данные</b>								
ω=πn/30, 1/с								
M=15,8*Sin(M <sub>ш</sub> /135), Нм								
P <sub>B</sub> =Mω, Вт								
P <sub>Э1</sub> =U <sub>1</sub> I <sub>1</sub> , Вт								
P <sub>Э2</sub> =3P <sub>1</sub> , Вт								
Cosφ <sub>2</sub> =P <sub>Э2</sub> /3U <sub>2</sub> I <sub>2</sub> ,								
η <sub>1</sub> =P <sub>B</sub> /P <sub>Э1</sub>								
η <sub>2</sub> =P <sub>Э2</sub> /P <sub>B</sub>								

Распределяются исполнители. Выполняются действия в порядке, описанном выше.

### **Строим графики механических характеристик**

Старший по работе на доске все остальные студенты в тетрадях заготавливают оси координат с учётом, что на поле графика должны быть размещены все снятые характеристики. Для первой характеристики каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске. Старший по работе на доске, а все остальные студенты в тетрадях проводят аппроксимирующие линии

В таком же порядке строится вторая характеристика.

Оставить место для графиков

### **Осуществляем оценку опытных и теоретических данных**

Сделать заключение, насколько экспериментальные характеристики соответствуют теоретическим предположениям.

## **2.8 Лабораторная работа №8 (4 часа).**

**Тема:** «Исследование электропривода генератора»

**2.8.1 Цель работы:** Научиться производить сборку схемы, осуществлять запуск электродвигателя, производить регулирование величины напряжения и нагрузки генератора постоянного тока, устанавливать, измерять и рассчитывать параметры режимов работы.

**2.8.2 Задачи работы:** Снять зависимость коэффициента мощности и коэффициента полезного действия асинхронного электродвигателя от коэффициента загрузки  $Cos\varphi, \eta = f(K_3)$ , а также построить механическую характеристику  $M = f(\omega)$ .

**2.8.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории

### **2.8.4 Описание (ход) работы:**

Генератор постоянного тока с независимым возбуждением используется как источник регулируемого напряжения для питания электродвигателей, нагревательных устройств в системах автоматического регулирования и для других целей. Приводится он во вращение асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором. В зависимости от величины тока возбуждения изменяется напряжение на сопротивлении нагрузки генератора и, следовательно, изменяется развиваемая им мощность, а вместе с

ней и мощность на валу и на зажимах приводного электродвигателя. Реактивная же мощность, потребляемая им из сети, остаётся практически неизменной. Поэтому коэффициент мощности электродвигателя с изменением нагрузки также изменяется.

Изменяется и коэффициент полезного действия, поскольку изменяются теплопотери, равные сумме постоянных потерь (а) и переменных (б), пропорциональных квадрату загрузки. При номинальной нагрузке мощность потерь равна

$$P_{ph} = a + b_H = \frac{P_H}{\eta_H} - \eta_H \quad (1)$$

или

$$P_{ph} = a + b_H = P_{1H} - P_{2H} = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_H - P_{2H}. \quad (2)$$

С учётом того, что для асинхронного электродвигателя отношение постоянных потерь к переменным при номинальной нагрузке

$$\alpha = \frac{a}{b_H} = 0,6, \quad (3)$$

где  $\alpha$  - коэффициент потерь, получим:

$$a = \frac{3}{8} P_{ph}; \quad b_H = P_{ph}/1,6. \quad (4)$$

Подсчитав, таким образом,  $a$  и  $b$ , можно найти потери мощности при любой нагрузке по формуле

$$P_{n} = a + b_H \frac{P_2^2}{P_{2H}^2} \quad (5)$$

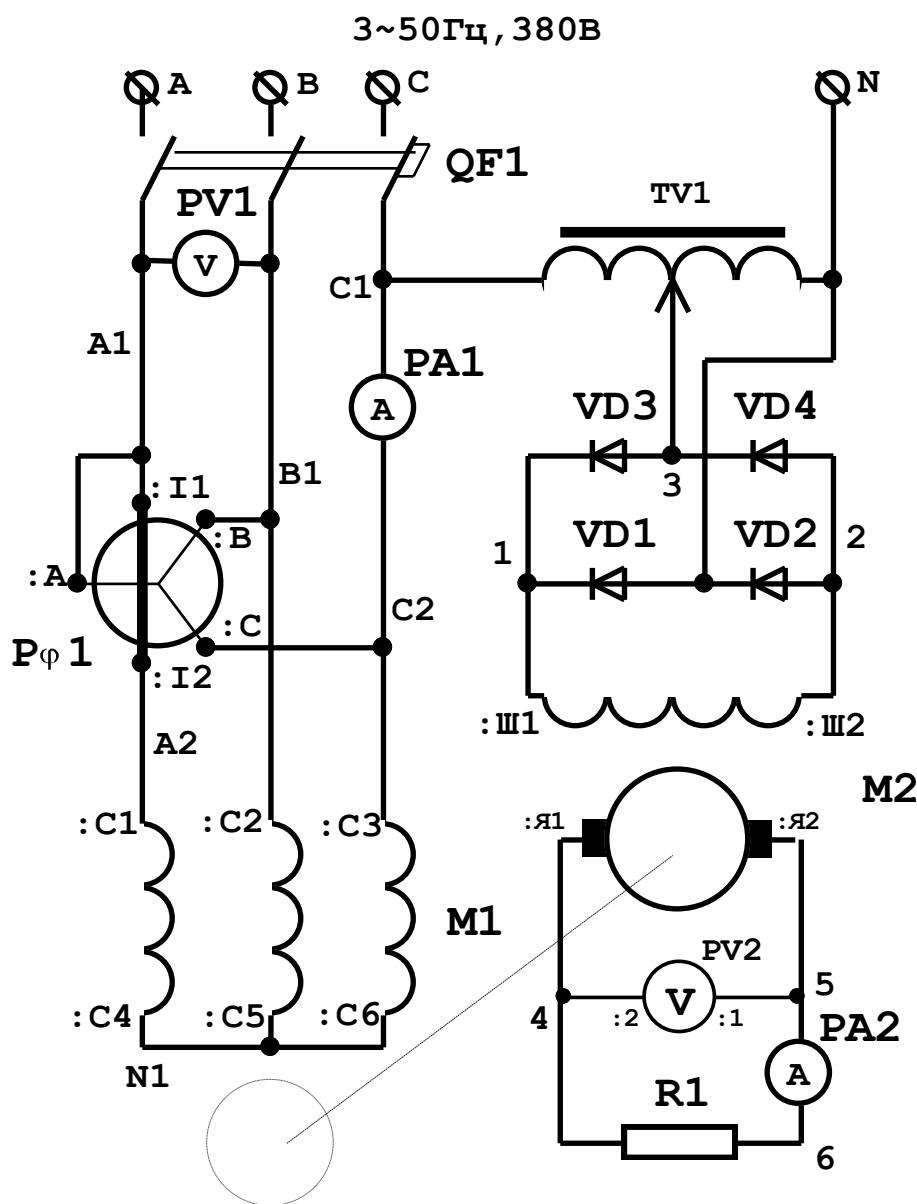
**Порядок выполнения задания**

#### **Записываем технические данные оборудования:**

Старший по работе заготавливает таблицу на доске и распределяет задания по строкам таблицы. Ответственные за каждую из строк записывают технические данные оборудования в таблицу на доске, а все остальные в тетради.

#### **Собираем схему экспериментальной установки**

Собрать электрическую схему по плакату. Сидоров собирает узел А1, Козлов А2 и т. д.. Во время сборки перечертим схему с плаката в тетради.



**Рис. 1: Принципиальная схема установки для испытания электропривода генератора.**

#### Записываем порядок запуска электродвигателя

- Установим движок автотрансформатора в нулевое положение (против часовой стрелки до упора).
- Включаем автоматический выключатель QF1, убеждаемся, что электродвигатель вращается по стрелке.
- Плавно увеличиваем напряжение на обмотке возбуждения генератора, убеждаемся, что напряжение на якоре и нагрузка увеличиваются.

Записываем действия по снятию и расчёту параметров характеристик

- Устанавливаем заданную величину коэффициента мощности;
- Измеряем и заносим в таблицу на доске ток, напряжение, и число оборотов вала электродвигателя в минуту;
- Рассчитываем и заносим в таблицу на доске частоту вращения, полную и активную мощности на зажимах;
- По уравнениям (1)...(4) определим полные  $P_{ph}$ , постоянные  $a$  и переменные при номинальной нагрузке  $b_n$  потери;

д) По уравнению (5) определим потери в установленном режиме  $P_n$ . Однако поскольку мощность на валу в установленном режиме нам не известна, заменим её величиной  $P_1 - P_n$  и получим следующее выражение

$$P_n = a + b_H \frac{P_1 - P_{n_0}}{P_{2H}^2}, \quad (6)$$

В данном выражении неизвестна только величина  $P_n$ . После преобразований, получим квадратное уравнение вида

$$A P_n^2 + B P_n + C = 0, \quad (7)$$

где:  $A = b_H$ ;  $B = -(P_{2H}^2 + 2b_H P_1)$ ;  $C = a P_{2H}^2 + b_H P_1^2$ .

Справка: квадратное уравнение вида  $a x^2 + b x + c = 0$  имеет решение

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

**Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных**

Старший по работе вычерчивает таблицу на доске, а все остальные в тетрадях. Распределяются исполнители.

**Данные опытов и расчётов**

**Таблица 2**

Исполнитель	Жуков	Козлов	И т. д.					
<b>Опытные данные</b>								
<b>Cosφ</b>	0,5	0,55	0,6	0,65	0,75	0,8	0,85	0,9
<b>U<sub>1,B</sub></b>								
<b>I<sub>1,A</sub></b>								
<b>n, об/мин</b>								
<b>Расчётные данные</b>								
<b>ω, 1/c</b>								
<b>S<sub>1</sub>, кВА</b>								
<b>P<sub>1</sub>, кВт</b>								
<b>B</b>								
<b>C</b>								
<b>P<sub>n</sub>, кВт</b>								
<b>P<sub>2</sub>, кВт</b>								
<b>M, Нм</b>								
<b>K<sub>3</sub></b>								
<b>η</b>								

Работу выполняет очередной студент и передаёт установку студенту, снимающему первую точку зависимости.

### Строим графики искомых зависимостей

Старший по работе на доске, а все остальные студенты в тетрадях заготавливают оси координат. Каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске, а все остальные студенты в тетради. Проводятся на графиках аппроксимирующие линии. Старший это делает на доске.

## **Оцениваем соответствие опытных и теоретических данных.**

Оценивается и записывается в тетрадях, насколько близко опытные данные согласуются с теоретическими. Если имеются расхождения, объясняется их причина.

### **2.9 Лабораторная работа №9 (2 часа).**

**Тема:** «Исследование электропривода вакуумного насоса»

**2.9.1 Цель работы:** Научиться производить регулирование величины вакуума насоса, устанавливать и измерять параметры режимов работы.

**2.9.2 Задачи работы:** Снять зависимость мощности и коэффициента мощности от величины вакуума, а также зависимость коэффициента мощности от коэффициента загрузки.

**2.9.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:** универсальный фронтальный стенд в 210 аудитории

#### **2.9.4 Описание (ход) работы:**

Вакуумный насос предназначен для обеспечения вакуума, необходимого для работы доильных аппаратов и молокопроводов. Приводится он во вращение асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором. В зависимости от развиваемого давления во всасывающем трубопроводе изменяется мощность, необходимая для вращения насоса, а, следовательно, и мощность на валу и на зажимах электродвигателя. Таким образом, коэффициент загрузки электродвигателя также изменяется, а реактивная мощность, потребляемая им из сети, остается практически неизменной. Поэтому коэффициент мощности электродвигателя с изменением нагрузки также изменяется.

Изменяется и коэффициент полезного действия, поскольку изменяются теплопотери, равные сумме постоянных потерь (a) и переменных (b), пропорциональных квадрату загрузки. При номинальной нагрузке мощность потерь равна

$$P_{nh} = a + b_n = \frac{P_n}{\eta_n} \quad (1)$$

или

$$P_{nh} = a + b_n = P_{1n} - P_{2n} = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_n - P_{2n}. \quad (2)$$

С учётом того, что для асинхронного электродвигателя отношение постоянных потерь к переменным при номинальной нагрузке

$$\alpha = \frac{a}{b_n} = 0,6, \quad (3)$$

получим:

$$a = \frac{3}{8} P_{nh}; \quad b = P_{nh}/1,6. \quad (4)$$

Подсчитав, таким образом, a и b, можно найти потери мощности при любой нагрузке по формуле

$$P_{nh} = a + b_n \frac{P^2}{P_{2n}^2} \quad (5)$$

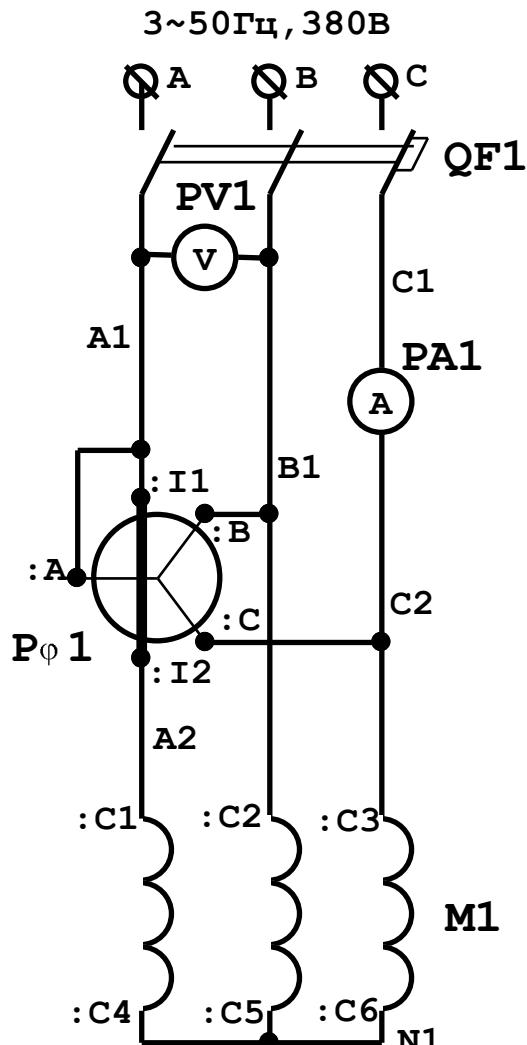
#### **Дополнительная литература**

Лекции по темам: «Механические характеристики и регулирование частоты вращения 3<sup>x</sup> фазного асинхронного электродвигателя» и «Коэффициент мощности в электросиловых установках».

Порядок выполнения задания

**Записываем технические данные оборудования:**

**Собираем электрическую схему:**



**Рис. 1: Принципиальная схема установки для испытания электропривода вакуумного насоса.**

Сидоров – узел А1; Козлов – узел А2 и так далее. Во время сборки перечертить схему с плаката в тетради.

**Заготавливаем таблицу записи наблюдений**

Старший по работе заготавливает таблицу на доске, а остальные студенты в тетрадях. Распределяются исполнители по снятию точек экспериментальной зависимости и записываются в первый столбец таблицы.

**Данные опытов и расчётов**

**Таблица 2**

p, atm	U,B	I,A	Cosφ	S <sub>1</sub> , ВА	P <sub>1</sub> , Вт	ΔP, Вт	P <sub>2</sub> , Вт	K <sub>3</sub>
0,1								
0,2								
0,3								
0,4								

0,5							
0,6							
0,7							
0,8							
0,9							

**Записываем действия при определении параметров точек экспериментальных зависимостей, заданных вторым столбцом таблицы 2:**

- a). Устанавливаем заданное давление с помощью дросселя на всасывающем патрубке;
- б). Измеряем и заносим в таблицу на доске ток, напряжение, и коэффициент мощности;
- в). Рассчитываем и заносим в таблицу на доске полную и активную мощность на зажимах, потери мощности, мощность на валу и коэффициент загрузки;

#### **Осуществляем запуск электронасоса**

Работу выполняет очередной студент, по всасыванию воздуха убеждается, что электродвигатель вращается в необходимом направлении и передаёт установку студенту, снимающему первую точку зависимости.

#### **Строим графики экспериментальных зависимостей**

Заготавливаем оси координат для первого и второго графиков (ведущий на доске все остальные студенты в тетрадях). Наносим каждую точку зависимости на поле графика (кроме того, каждый из ответственных за точку наносит её на поле графика, расположенного на доске). Проводим на графиках аппроксимирующие линии (ведущий это делает на доске, а все остальные в тетрадях)

Оцениваем, насколько близко опытные данные согласуются с теоретическими данными.